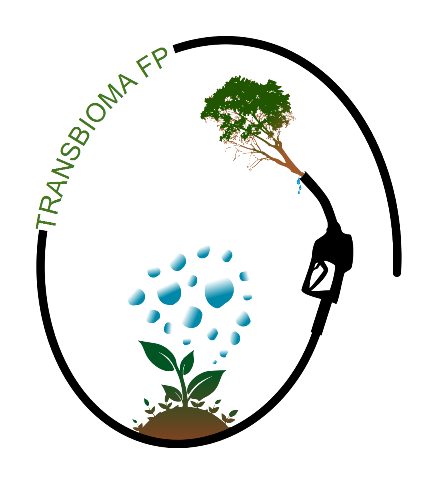
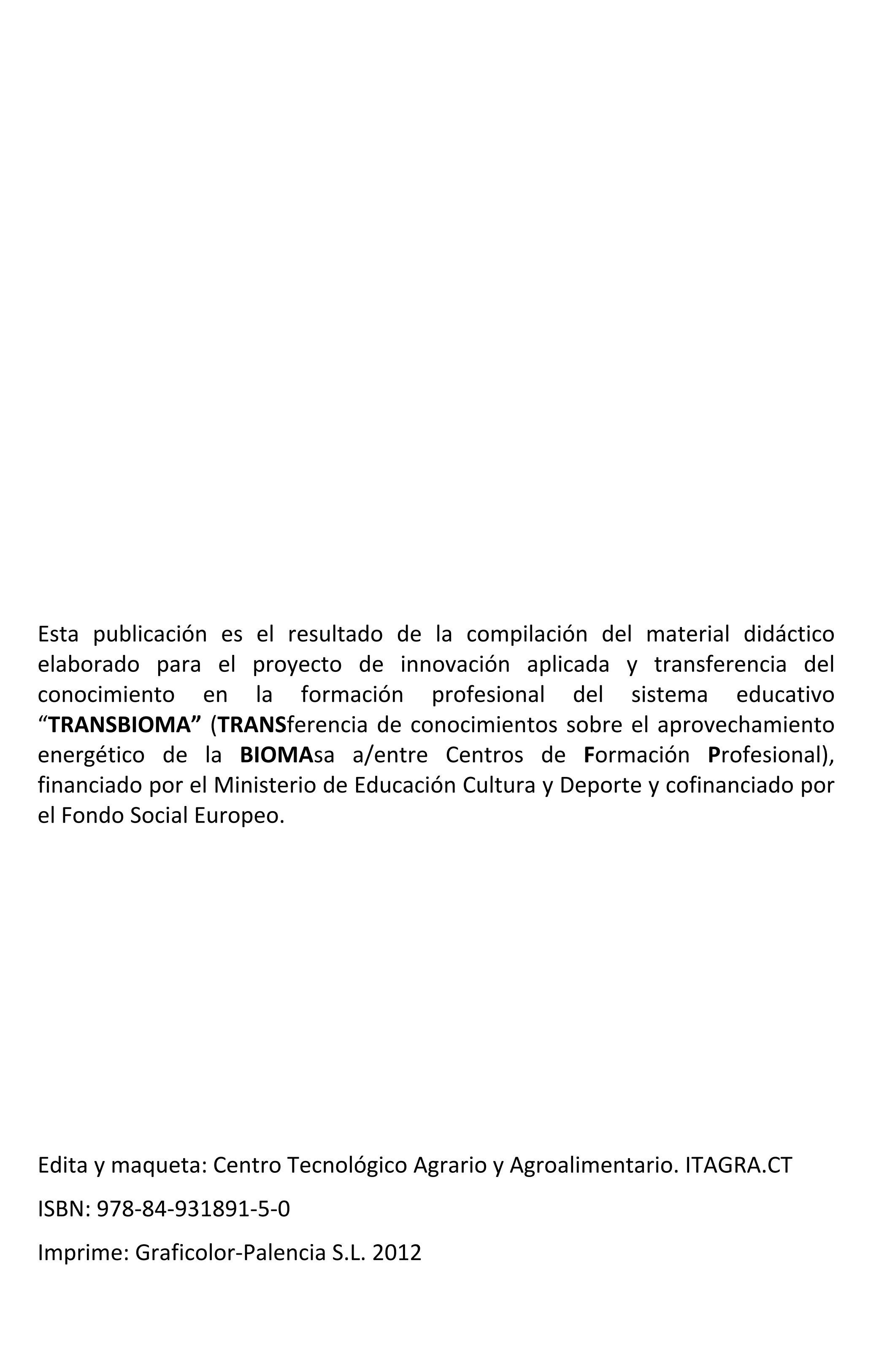
BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD





BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD



Esta publicación es el resultado de la compilación del material didáctico elaborado para el proyecto de innovación aplicada y transferencia del conocimiento en la formación profesional del sistema educativo "**TRANSBIOMA"** (**TRANS**ferencia de conocimientos sobre el aprovechamiento energético de la **BIOMA**sa a/entre Centros de **F**ormación **P**rofesional), financiado por el Ministerio de Educación Cultura y Deporte y cofinanciado por el Fondo Social Europeo.

Edita y maqueta: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT

ISBN: 978-84-931891-5-0

Imprime: Graficolor-Palencia S.L. 2012

AUTORES

BLOQUE I. MATERIAS PRIMAS

Ana Isabel de Lucas Herguedas [1] — Dra. Ingeniera de Montes

Carlos del Peso Taranco [2] — Ingeniero de Montes

BLOQUE II. BIOCOMBUSTIBLES

Ana Isabel de Lucas Herguedas [1] — Dra. Ingeniera de Montes

BLOQUE III. SOSTENIBILIDAD

Encarna Rodríguez García [2] — Dra. Ingeniera de Montes

BLOQUE IV. NORMATIVA

Prado Prieto Paniagua [2] — Licenciada en Filosofía y Letras

COLABORAN EN LA REDACCIÓN

Esther Sanz González [1] — Ingeniera Técnico Agrícola

Marta Sánchez Martín [1] — Licenciada en Química y Bioquímica

[1] Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT. Avenida de Madrid, 44. C.U. "La Yutera" Edif. A. 34004 Palencia. www.itagra.com

[2] Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible. Universidad de Valladolid-INIA (IUGFS). Avenida de Madrid, s/n. 34004 Palencia. www.research4forestry.eu

BLOQUE I. MATERIAS PRIMAS



BLOQUE I. MATERIAS PRIMAS

1 CONCEPTO, CLASIFICACION Y USOS DE LA BIOMASA

1.1 DEFINICIÓN Y CONCEPTO

Según la Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, se define **biomasa** como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Figura I-1). Por tanto, los recursos biomásicos provendrán de fuentes muy diversas y heterogéneas.

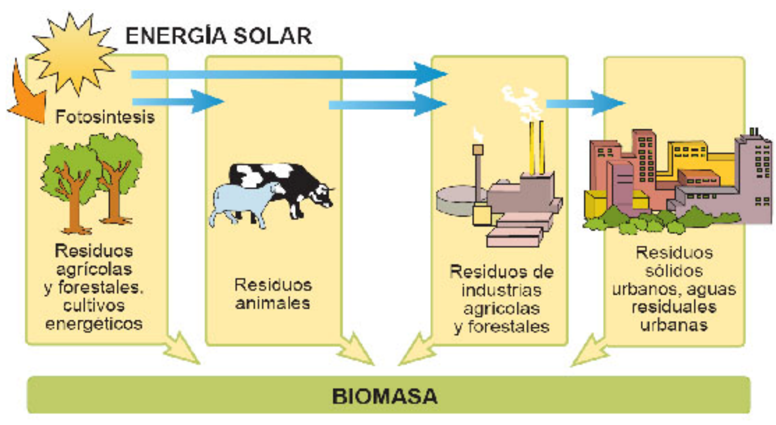


Figura I-1: Tipos de biomasa (Fuente: http://antiguo.minenergia.cl)

La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol: a partir del proceso denominado fotosíntesis, las plantas absorben energía lumínica del sol, agua del suelo y el CO_2 de la atmósfera, almacenando en ellas sustancias orgánicas (energía) y liberando oxígeno durante el proceso. Posteriormente, los animales incorporan y transforman esta energía al alimentarse de las plantas, por lo que los productos de esta transformación, que se consideran residuos, también pueden ser utilizados como recurso energético.

1.2 ORIGEN Y TIPOS DE BIOMASA

Existen numerosas clasificaciones de biomasa, pero las más aceptadas, y fundamentadas en su composición, origen, y estado, son las que se reflejan en la Figura I-2:

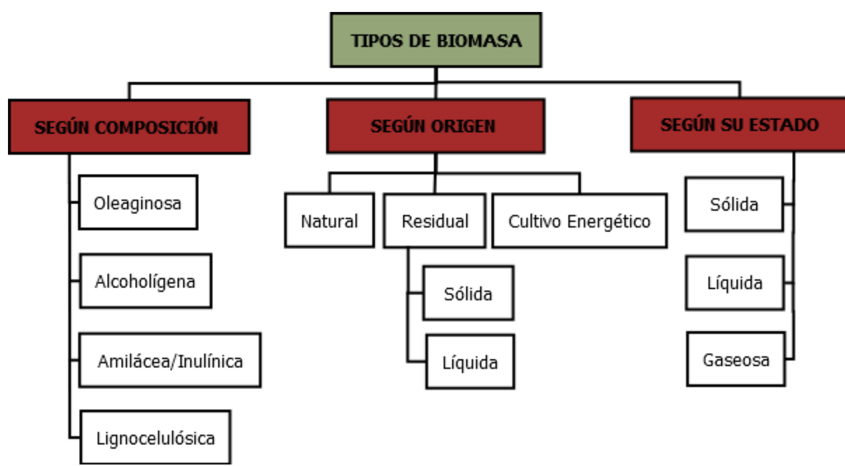


Figura I-2.- Tipos de biomasa según diferententes clasificaciones (Fuente: Elaboración propia)

1.2.1 Según su origen

1.2.1.1 Natural

Es la biomasa que se produce de forma espontánea en la naturaleza, en ecosistemas que no hayan sufrido intervención humana. Su explotación, en general, no es interesante por razones económicas ya que la gestión de la adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización no son rentables. A pesar de ello, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vías de desarrollo.

1.2.1.2 Residual

Consiste en la biomasa que procede de los residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades humanas y los vertidos denominados biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos, y entre ellos pueden citarse:

- **Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería**: pajas de cereales, zuros de maíz, excedentes agrícolas, los originados en los tratamientos selvícolas, etc.
- **Residuos de industrias agrícolas y forestales**: como las provenientes de la producción de aceite de oliva, aceite de orujo de oliva, industria vinícola y alcoholera, producción de frutos secos, recortes de madera, serrín, etc…
- **Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU)**.
- **Residuos ganaderos**: principalmente purines.
- **Residuos agroindustriales**: industrias lácteas, papeleras, destilerías, almazaras, conserveras, etc.
- **Aceites alimentarios usados**.

1.2.1.3 Cultivos energéticos

Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. A diferencia de los cultivos agrícolas alimenticios, los agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa, y no de calidad, y suelen ser especies caracterizadas por su robustez a fin de abaratar los costos de cultivo y, por tanto, el precio de la biomasa final (Figura I-3).



Figura I-3. Dos cultivos energéticos: colza etíope (Brassica carinata) y cardo (Cynara carduncululs)

1.2.2 Según su estado

Por otro lado, podemos clasificar la biomasa según su estado en:

1.2.2.1 Biomasa sólida

Este tipo de biomasa es el más conocido, y en él podemos englobar la madera obtenida de tratamientos selvícolas forestales, residuos de las industrias que trabajan con cualquier tipo de biomasa (carpinterías, papeleras, etc.), residuos obtenidos en las podas y limpieza de parques y jardines, subproductos o residuos de naturaleza agrícola (e.j. paja), cultivos energéticos, turba, residuos agroindustriales (orujo, serrín, huesos de aceituna), fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), etc (Figura I-4).



Figura I-4. Residuos de tratamientos culturales forestales y agroindustriales (Fuente: http://www.garzongreenenergy.es)

1.2.2.2 Biomasa líquida

Este grupo englobaría a los residuos ganaderos, los residuos industriales biodegradables y las aguas residuales urbanas (ARU). Gran parte de la bibliografía consultada incluye también en este punto los aceites y biocarburantes (bioetanol y biodiesel).

1.2.2.3 Biomasa gaseosa

Se trata del metano o biogás obtenido a partir de residuos de animales, residuos agroalimenticios, vertederos y escombreras, etc., a través de diversos procesos (termoquímicos, microbiológicos, etc.)



Figura I-5. a) Biodiesel; b) Planta generadora de biogás (Fuentes: http://biodilan.com y http://www.naturalenergy.es)

1.2.3 Según su composición

Y por último, en la siguiente tabla se refleja otra clasificación de la biomasa según su composición, con ejemplos basados en biomasa agrícola:

Tabla I-1.- Tipos de biomasa agrícola según su composición

TIPO	SUSTANCIA BIOORGÁNICA		EJEMPLOS
LIPIDOS			
Oleaginosa			Semillas de girasol, soja, maíz, lino, almendro
HIDRATOS DE CARBONO			
Alcoholígena	Monosacáridos	Glucosa	Pulpa de fruta
		Fructosa	Pulpa de fruta
	Disacáridos	Sacarosa	Caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha
Amilácea /Inulínica	Polisacáridos	Insulina	Tubérculo de patata y rizomas de dalia, achicoria
		Almidón	Granos de cereal, Tubérculo de patata
Lignocelulósica	Polisacáridos	Hemicelulosa	Maderas en general
		Celulosa	Residuos lignocelulósicos

1.3 CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA

La evaluación de la viabilidad técnica y económica de un proceso de conversión de la biomasa en energía requiere considerar ciertos parámetros y condiciones, agrupados en:

1.3.1 Composición química

Los diferentes tipos de biomasa están formados por una parte orgánica, una inorgánica y agua. Durante la combustión, se quema la parte orgánica, la inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido.

La composición química de la biomasa original se puede conocer realizando análisis de los elementos más importantes, como carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S), y en algunos casos cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma del resto de elementos más las cenizas.

1.3.2 Contenido en humedad

O también denominada humedad relativa, es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad de la biomasa puede medirse en base seca (h) o en base húmeda (H), ya que se puede considerar el peso húmedo de la leña húmeda (P_h) y el peso seco (P_o) obtenido al pesar la leña tras ser secada en una estufa, para evaporar el agua presente. Así tenemos:

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o} \qquad\qquad H = \frac{P_h - P_o}{P_h}$$

Cuanto menor sea este contenido mejor será el valor calorífico de esa biomasa y su proceso de combustión, ya que cuando se quema la biomasa, primero hay que evaporar el agua antes de que el calor esté disponible. La mayoría de los procesos de conversión energética requieren valores de humedad relativa inferiores al 30%. Con valores superiores se hace necesaria la implementación de operaciones de acondicionamiento y secado previas al proceso de conversión de energía.

1.3.3 Porcentaje en cenizas

Indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima. Conviene que su porcentaje en relación a la materia seca sea el menor posible.

1.3.4 Poder calorífico

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa y se expresa como la cantidad de energía por unidad física (ej. Joule por kilogramo). Es la energía que se libera en forma de calor cuando la biomasa se quema completamente. De manera más concreta, el poder calorífico superior (*PCS*) es aquel calor que verdaderamente se produce en la reacción de combustión, y el

inferior (*PCI*) el realmente aprovechable, producido sin utilizar la energía de la condensación del agua y de otros procesos.

El *PCI* de un combustible se determina a partir del PCS, extrayendo el calor latente del agua formada:

$$PCI = PCS - 2{,}5(9H + H_2O)$$

donde:
PCI Poder calorífico inferior (MJ/Kg)
PCS Poder calorífico superior (MJ/Kg)
2,5 Calor de condensación del agua a 0ºC (MJ/kg agua)
9 Kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno
H Tanto por uno de hidrógeno en el combustible
H_2O Tanto por uno de humedad del combustible

Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para alguno de ellos, como es el caso de la biomasa residual húmeda, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento.

1.3.5 Densidad aparente

Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta. Los combustibles que presentan una densidad aparente elevada favorecen la relación de energía por unidad de volumen, ya que se requieren menores tamaños de los equipos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por el contrario, las materias primas de baja densidad aparente necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte.

1.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA

La utilización de la biomasa con fines energéticos posee numerosas **ventajas**, no solo para el propietario de la instalación, sino también para el conjunto de la sociedad. Estas ventajas pueden agruparse en:

Ventajas ambientales

- **Disminución de las emisiones de CO_2 respecto a otros combustibles fósiles:** Ya que aunque para realizar el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión (que dará como resultado H_20 y CO_2), la cantidad de dióxido de carbono emitida, causante del efecto invernadero, se considera que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Por tanto, esta combustión no supone un incremento de este gas a la atmósfera.
- **No emite contaminantes sulforados o nitrogenados (causantes de la lluvia ácida), ni apenas partículas sólidas:** Además, el uso de biocarburantes en

motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas, SO_2 y CO).

- **Disminución de residuos:** Gracias al reciclaje de la biomasa procedente de residuos de otras actividades. Por ejemplo, el empleo del proceso de digestión anaerobia para tratar las biomasas residuales húmedas, además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia (residuos) pueden utilizarse como fertilizantes en la agricultura.
- **Evita la erosión y la degradación del suelo**: A través de la implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas, sobre todo si se realiza con especies perennes.

Ventajas socioeconómicas

- **Diversificación energética:** El aprovechamiento de la biomasa contribuye a este objetivo marcado por los planes energéticos nacionales y europeos.
- **Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.**
- **Nuevas oportunidades para el sector agrícola:** ya que los cultivos energéticos podrían sustituir a los cultivos excedentarios en el mercado de alimentos.
- **Puede contribuir a un aumento económico en el medio rural:** con el aprovechamiento de algunos tipos de biomasa, principalmente la forestal y los cultivos energéticos.

Pero no hay que olvidar algunos pequeños **inconvenientes** derivados de las características que presenta la biomasa:

- Poseen **menores rendimientos energéticos** que los combustibles derivados de los combustibles fósiles.
- De momento, poseen **mayores costes de producción** frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- La biomasa posee una **baja densidad energética**, es decir, que para conseguir la misma cantidad de energía se requiere utilizar más cantidad de materia prima. Esto hace que pueden darse problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o **transformación** para su utilización.

1.5 APLICACIONES

La gran variedad de biomasas existentes unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de ésta en energía (combustión directa, pirólisis, gasificación, fermentación, digestión anaeróbica,...) permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad, biocombustibles y gases combustibles:

1.5.1 Producción de energía térmica

Aprovechamiento convencional de la biomasa sólida (natural y residual), aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido.

Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor o calentar agua. La producción térmica sigue una escala de usos que comienza en las calderas o estufas individuales utilizadas tradicionalmente en los hogares para calentar estancias y/u otros sistemas con producción de agua caliente sanitaria. En un segundo nivel se sitúan las calderas diseñadas para proveer de calor y agua caliente a bloques de edificios o viviendas.

1.5.2 Producción de energía eléctrica

Obtenida minoritariamente a partir de biomasa residual (restos de cosecha y poda, orujillo y el alperujo) y principalmente a partir de cultivos energéticos leñosos, de crecimiento rápido y herbáceos. También se utiliza el biogás resultante de la fermentación de ciertos residuos (lodos de depuradora, RSU) para generar electricidad.

La producción de electricidad precisa de sistemas aún más complejos dado el bajo poder calorífico de la biomasa, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido en volátiles. Para ello se necesitan centrales térmicas específicas con grandes calderas, con volúmenes de hogar mayores que si utilizaran un combustible convencional, que conllevan inversiones elevadas y reducen su rendimiento. En función del tipo y de la cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin.

1.5.3 Producción de biocombustibles

En este punto se distingue entre la producción de biocarburantes destinados a su utilización en vehículos con motor diesel y los destinados a los vehículos con motor de encendido provocado. Los primeros se obtienen de cultivos o especies vegetales oleaginosas (ej. girasol, colza, cacahuete) y sustituyen al diesel tradicional, y los segundos se obtienen de cultivos o especies vegetales ricas en azúcares (remolacha, pataca, caña de azúcar, maíz, trigo…) y sustituyen a las gasolinas o aditivos de las gasolinas sin plomo.

1.5.4 Producción de gases combustibles

Es una aplicación poco utilizada actualmente que consiste en la descomposición de la biomasa en un digestor para obtener un gas, cuyo compuesto combustible es básicamente metano, pero también contienen nitrógeno, vapor de agua y compuestos orgánicos. El proceso es adecuado para tratar biomasa de elevado contenido en humedad y poco interesante en otras aplicaciones, bien por su calidad o por la poca cantidad disponible.

El gas obtenido es de bajo poder calorífico, pero útil en aplicaciones térmicas en entornos ganaderos o agrícolas, suministrando luz y calor.

1.6 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA. 2008. Situación de la Biomasa en Andalucía. Consejería de innovación, ciencia y empresa. Junta de Andalucía.

Camps M, Marcos F. 2008. Los biocombustibles. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 384 pp.

DIR 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

EVE. 2001. Valorización de la biomasa en el País Vasco. Ed. Ente Vasco de la Energía (EVE). Bilbao, España. 89 pp.

Fernández JM. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. A. Madrid Vicente ed. Madrid

PBCyL. 2010. Plan Regional de Ámbito sectorial de la bioenergía de Castilla y León. Ed. Junta de CyL, EREN e ITACyL.

PER 2011-2020. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España.

2 BIOMASA FORESTAL

2.1 INTRODUCCIÓN

Se define biomasa forestal como toda materia orgánica utilizable como fuente de energía y cuyo origen proviene de los trabajos de mantenimiento y mejora de las masas forestales (ej. leñas) y de los subproductos generados por las industrias de transformación de la madera (ej. serrín, cortezas).

Los productos leñosos han sido la primera fuente de energía renovable utilizada por el hombre hasta la revolución industrial, incluso hoy en día, para gran parte de la humanidad, especialmente en los países más desfavorecidos, sigue siendo la principal fuente de energía, usada como combustible. Estos combustibles leñosos, según su origen se clasifican en:

- **Combustibles de madera directos** (biomasa forestal primaria): Están constituidos por madera y productos leñosos extraídos directamente de terrenos forestales.
- **Combustibles de madera indirectos**: Subproductos derivados de industrias primarias de la madera que procesan directamente el árbol o tronco que llega del monte, y secundarias que procesan la madera ya elaborada en las industrias de primera transformación, pueden producir residuos con aditivos y colas. Las industrias forestales de primera y segunda transformación generan residuos que habitualmente se utilizan, a su vez, para generar la energía que se necesita en el proceso productivo de la fabricación de tableros o de pasta, y en menor proporción, en otras como aserraderos, carpintería o fabricación de muebles. Los tipos de residuos que podemos encontrar son recortes de madera, serrín y viruta, palets y envases, madera tratada, lejías negras procedentes de la fabricación de celulosa, o restos de corcho de la industria del tapón entre otros.
- **Combustibles de madera recuperados**: Derivados de todas las actividades económicas y sociales ajenas al sector forestal, tales como desechos de la construcción, demolición de edificios, bandejas de carga, contenedores, cajas de madera, …etc.

Las principales vías de gestión de estos residuos se basan en la industria del tablero, el uso térmico o eléctrico, el compost y las camas de ganado. Teniendo en cuenta que el 100% de estos residuos supone una fuente renovable de energía, el potencial energético para los próximos años en España sería el que viene reflejado en la Tabla I-2:

Tabla I-2. Potencial disponible de maderas recuperadas (Fuente: PER 2011-2020)

AÑO	t	KTEP RENOVABLES	GWhe RENOVABLES
2010	750.000	337	981
2015	825.000	371	1.079
2020	907.500	408	1.187




Figura I-6. a) Restos de claras o cortas de mejora; b) Residuo de industria primaria (Fuentes: http://losrecursosdelbosque.blogspot.com.es y http://madera.fordaq.com)

2.2 BIOMASA FORESTAL PRIMARIA

La biomasa forestal primaria es la fracción biodegradable de los productos y residuos generados en los montes y que son procesados con fines energéticos. Los principales materiales vegetales que constituyen esta fracción son:

- **Productos derivados de tratamientos selvícolas:**
    - Ramas y ramillas procedentes de trabajos de poda.
    - Pies procedentes de cortas de clareo (edades tempranas), primeras claras, cortas fitosanitarias o pies afectados por incendios forestales. Ramas y troncos de pies mal formados.
- **Restos de cortas:** Ramas y raberones procedentes de cortas finales antes de la regeneración de los bosques y de cortas intermedias (segundas, terceras y cuartas claras).
- **Desbroces de matorral:** Limpieza de matorrales leñosos arbustivos y subarbustivos en masas arboladas.
- **Cultivos energéticos leñosos:** Se realizan con plantaciones de alta densidad y turnos muy cortos, seleccionando las especies según la cantidad de biomasa que producen. En el sur de Europa los géneros más utilizados son: *Populus*, *Salix*, *Acacia*, *Eucalyptus*, etc. (4 del Bloque I de este curso).

La gestión de la biomasa forestal primaria, desde su recogida hasta que se convierte en energía, es un proceso costoso que requiere una correcta planificación y el empleo de nuevas tecnologías para conseguir su optimización. La baja densidad aparente que tiene la biomasa forestal hace que el transporte sea difícil y muy costoso y que su empleo energético necesite grandes espacios de almacenamiento. Es necesario por tanto conseguir productos más compactos y fácilmente utilizables.

La biomasa forestal primaria puede sufrir diversas transformaciones para su traslado a fábrica (Figura I-7):

- **Empacado de residuos forestales**. Recogidos con un autocargador son trasladados a fábrica mediante transporte en camión donde se procede a su astillado y posterior transformación o uso (Figura I-7a).
- **Carga directa de la biomasa forestal en camiones de trasporte**. Esta opción no es la más común pues requiere un exceso de volumen para el poco peso de la biomasa forestal primaria. En su caso es necesario un astillado y transformación en fábrica.
- **Astillado directo en monte y traslado en contenedor hasta fábrica**. Es una de las opciones que más se está imponiendo (Figura I-7b).

Por otro lado, la heterogeneidad de la biomasa así como la aplicación que se le pretende dar, determina el tratamiento necesario para su uso. Los procesos de pretratamiento de la biomasa, tanto en fábrica como en campo son: Secado (natural o forzado), astillado (triturado o molienda), densificación (pélets, briquetas y empacado).

Según la Terminología Unificada sobre Dendroenergía (UWET), publicada por la FAO en su programa de asociación comunidad Europea 2000-2002, la clasificación de los productos forestales considerados como biomasa forestal son: leña, astillas, pélets, briquetas, carbón vegetal, licores negros, y otros combustibles de madera. En este capítulo se verán las leñas, y aquellos biocombustibles derivados de las industrias de primera y segunda transformación, desarrollándose el resto de biomasa forestal en el capítulo 2 del Bloque II de Biocombustibles sólidos.



Figura I-7. Esquemas de producción de biomasa forestal y flujo monte-industria: a) empacado en monte; b) astillado en monte y traslado a fábrica en contenedor (Fuente: Hakkila 2004)

2.2.1 Leñas

Se entiende por leña a la parte de árboles y arbustos que se utiliza para obtener energía. Se compone principalmente por madera y corteza y puede quemarse directamente con fines energéticos, ser transformada en astillas o carbón vegetal, o aportarse al suelo como nutriente una vez se haya triturado.

2.2.1.1 Propiedades físicas

2.2.1.1.1 Forma y aspecto

La forma de las leñas es una característica muy importante ya que afecta a la combustión de la misma. Si el diámetro es pequeño, la leña arde más deprisa y su densidad es menor. Por otro lado, la homogeneidad en la forma de la madera influirá en el coeficiente de apilado. El color de la madera dependerá de la especia a considerar, de su humedad y de los líquenes, o incluso impurezas, que estén adheridos a ella durante el manejo y transporte.

2.2.1.1.2 Densidad y peso

El volumen de leña se mide en **estéreos**, y este concepto se define como un metro cúbico de leñas en el que están incluidos los huecos que quedan entre las maderas apiladas, es decir, un metro cúbico de volumen aparente. Su peso dependerá de la forma y dimensiones de la leña apilada, de su humedad, de la densidad de la madera y de la corteza y de la habilidad del operario para apilar la leña aprovechando el espacio al máximo.



Figura I-8. Montón de leña apilada y estéreos de leña preparados para vender

El **coeficiente de apilado** es la relación entre lo que ocupa la leña en realidad (volumen real) y un estéreo (volumen aparente), siendo:

$$coeficiente\ de\ apilado = \frac{m^3 real}{m^3 aparente}$$

La **densidad** de la leña afecta enormemente a los costes de transporte. A estos efectos convienen más las leñas densas ya que ocupan menos espacio y su transporte resulta más barato. Para calcular la densidad de la leña se tendrá en cuenta tanto la madera como la corteza, según la siguiente fórmula:

$$d_l = \frac{m_m + m_c}{\frac{m_m}{d_m} + \frac{m_c}{d_c}}$$

donde, m_m y m_c son las masas de la madera y corteza

d_l, d_m y d_c las densidades de la leña, madera y corteza respectivamente

2.2.1.1.3 Humedad

La humedad de las leñas es una propiedad muy importante ya que afecta directamente al poder calorífico de la biomasa. A mayor humedad, menos útil es la leña para obtener energía, ya que el poder calorífico de la misma es menor, ya que parte del calor generado en la combustión de la leña se emplea para evaporar el agua presente en la misma, y no para generar energía. Además, la humedad influye en los costes de transporte.

2.2.1.1.4 Superficie específica y porcentaje de corteza

La superficie específica de la leña es el área que ocupa la madera por unidad de masa (m^2/g). Dependerá, por tanto, de la forma, tamaño, etc. A mayor superficie específica, más rápida será la combustión.

Por otro lado, el poder calorífico, la composición química, y otras variables físico-químicas son diferentes en la madera que en la corteza, por lo que hay que diferenciar una de otra. El porcentaje en corteza varía a lo largo del tronco, siendo mayor en las partes bajas de los árboles.

2.2.1.2 Propiedades químicas

2.2.1.2.1 Composición química

La leña es un material muy heterogéneo y, además, la corteza, madera e impurezas poseen composiciones totalmente diferentes entre sí. Los dos compuestos que se presentan en mayor proporción en la madera son el carbono (~49%) y el oxígeno (~44%), aunque también contiene elementos en menores proporciones como el hidrógeno (~6%), nitrógeno (~0,3%) y trazas de azufre.

El contenido en azufre de la madera puede originar dióxidos de azufre durante la combustión, pero su cantidad estará siempre por debajo que en el caso de quemar combustibles fósiles. Lo mismo ocurre con el nitrógeno, ya que los óxidos de nitrógeno generados en la combustión serán mínimos.

En cuanto a la composición química de compuestos, la leña se compone fundamentalmente de madera, y ésta así mismo de celulosa, hemicelulosa y lignina. Al igual que la composición química elemental, la composición química de estos compuestos, y su porcentaje, influirán en los gases emitidos en la combustión y en la composición química de las cenizas generadas.

2.2.1.2.2 Poder calorífico

El poder calorífico, como ya se definió en el capítulo 1 de este Bloque, es la cantidad de energía por unidad de masa que desprende un combustible cuando se quema y se expresa en kcal/kg o en MJ/kg. En las Tablas I-3 y I-4 pueden observarse diferentes

valores del poder calorífico para un estéreo de leña de diferentes especies y para distintas fracciones de biomasa forestal.

Tabla I-3. Energía de 1 estéreo de leña para especies forestales (Fuente: Camps y Marcos 2001)

ESPECIE	MJ/estéreo
Coníferas	
Pinus radiata	2.131,16
Pinus nigra	4.557,89
Pinus sylvestris	5.800,43
Pinus pinea	5.194,15
Pinus halepensis	3.561,29
Pinus pinaster	4.226,41
Frondosas	
Quercus robur	6.716,24
Quercus ilex	6.759,75
Quercus pyrenaica	8.041,07
Quercus faginea	7.887,16
Eucalyptus globulus	5.196,72
Eucalyptus camadulensis	6.659,39

Tabla I-4. Poder calorífico de diferentes fracciones de biomasa (Fuente: IDAE 2007)

PRODUCTO	PCS (MJ/kg)	PCI a humedad x (MJ/kg)	
	Humedad = 0%	x	PCI
Leñas y ramas coníferas	20,7	20%	15,0
Leñas y ramas frondosas	19,3	20%	13,9
Serrines y virutas coníferas	20,4	15%	15,9
Serrines y virutas frondosas autóctonas	19,4	15%	15,0
Serrines y virutas frondosas tropicales	20,4	15%	15,8
Corteza coníferas	21,1	20%	15,3
Corteza frondosas	19,6	20%	14,1

2.2.1.3 Propiedades físico-químicas

2.2.1.3.1 Variables de combustibilidad

Este tipo de variables se refieren a los parámetros más influyentes en el proceso de combustión, como el coeficiente de conductividad térmica, y las que tienen en cuenta las temperaturas y tiempos de inicio de combustión, inflamación, etc.

El **coeficiente de conductividad térmica** mide la capacidad de una materia para conducir calor. Depende de la temperatura a la que se encuentre el material. En relación a la combustión, se tienen en cuenta dos variables: el **tiempo de combustión** y la **temperatura de combustión**. El primero indica el tiempo que tarda un elemento en entrar en combustión cuando se introduce en un horno, y depende de la temperatura. La temperatura de combustión es aquella a la que un determinado material comienza a arder. Su valor depende de la naturaleza de la leña (ej. composición química,

superficie específica, conductividad térmica, etc.) y es independiente de la temperatura del horno.

La inflamabilidad está determinada por el tiempo y la temperatura de inflamación. El **tiempo de inflamación** es el tiempo que tarda un determinado material para generar llamas. Depende de la temperatura del horno. La **temperatura de inflamación** es aquella temperatura mínima y necesaria para que se produzcan llamas en la combustión del combustible y depende de la temperatura del horno. Por último, el **tiempo de llama** es aquel durante el cual, una muestra de biomasa está emitiendo llama en condiciones de temperatura constantes. Este tiempo es mayor que el de combustión o el de inflamación. Depende del coeficiente de conductividad térmica, de la relación combustible/comburente y de la temperatura del horno. La **temperatura máxima de llama** es la temperatura más alta que alcanza la llama y condiciona el material del que está elaborado el horno donde se va a realizar la combustión.



Figura I-9. Combustión y diferentes modelos de estufas modernas

2.3 SUBPRODUCTOS DERIVADOS DE INDUSTRIA DE PRIMERA TRANSFORMACIÓN

Consideramos industrias de primera transformación de madera a las industrias de:

- **Aserrado y tableros**
- **Corcho**
- **Pastas celulósicas**

2.3.1 Industria del aserrado y de los tableros

La **industria del aserrado** tiene como productos finales tablas, tablillas, tablones, piecerío, largueros, viguetas, cachones y listones. Para su obtención se utiliza como materia prima la madera en rollo, proveniente tanto de especies nacionales como exóticas. Durante el proceso productivo (Figura I-10a) se obtienen como residuos más importantes: corteza, serrín, costeros y recortes.

En general, la corteza se desecha en todos los casos, ya que posee unas características físicas muy diferentes a la madera y un aspecto no deseable en la mayoría de usos

finales. El serrín se produce en todas las sierras: tronzado, aserrado, canteado y retestado, y suele transportarse mediante conductos de aire a depósitos para su combustión o es utilizado para la fabricación de pélets o briquetas (Figura I-10b).



Figura I-10. a) Aserrado de madera y b) restos de aserrín en el patio de un aserradero.

En el proceso de aserrado también se obtienen costeros como producto de desecho, que junto con los recortes obtenidos en el canteado y el retestado, se pueden reutilizar en otras industrias de la madera (principalmente en las industrias de tableros) o como biocombustible, ya sea en plantas de biomasa o en el propio aserradero, ya que diversos procesos como el secado poseen una demanda energética elevada que puede suponer hasta un 70% de todo el proceso. Otra opción de valorizar energéticamente estos residuos se basa en su peletizado y/o briquetado.

La **industria del tablero** engloba la fabricación de productos de muy diversas características y composiciones, pero fundamentalmente genera tableros de tres tipos: contrachapado, de partículas y de fibras. Los primeros, están formados por partículas de madera o de otros materiales leñosos, aglomerados entre sí a través de adhesivos aplicados en condiciones de temperaturas y presiones elevadas. Los tableros de fibras (Figura I-11a) están elaborados a partir de fibras lignocelulósicas aglomeradas mediante resinas sintéticas, y prensadas en caliente. Y los tableros de contrachapado consisten en chapas de madera dispuestas formando un ángulo de 90º y encoladas.

En estos procesos, el principal residuo que se genera es la corteza que se emplea generalmente como combustible. Por otro lado se obtienen, en menor medida, los denominados polvo de astilla y polvo de lija, recortes, serrines, cilindros centrales de desenrollo, o chapas defectuosas y restos de chapas. En general, todos estos subproductos obtenidos en cada proceso, se utilizan como combustible en la propia fábrica para generar energía (en forma de vapor de agua) utilizable en fases concretas de dichos procesos (ej. desfibrado, prensado, secado), o para calefacción. Estos residuos también pueden ser triturados y densificados para obtener pélets y/o briquetas.



Figura I-11. a) Tablero de fibra; b) tapones de corcho

2.3.2 Industria del corcho

Dentro de la industria del corcho el proceso que mayor cantidad residuos genera es la fabricación de tapones. Los residuos generados en este proceso son reutilizados en otras industrias del sector como aglomerados, forros y aislantes. En general, el único desecho importante es el polvo de corcho, que posee un alto potencial energético y puede utilizarse como combustible. Las briquetas de polvo de corcho se pueden utilizar como combustible para alimentar las calderas de cocción de corcho en la propia industria corchera.

2.3.3 Industria de las pastas celulósicas

Las industrias de este sector presentan importantes consumos térmicos que son en parte cubiertos con residuos generados en los propios procesos. Los combustibles más empleados son cortezas, serrines y lejías negras. Las lejías o licores negros representan una parte muy importante del consumo del proceso y, gracias a su combustión, por un lado se recupera parte de la materia prima mineral contenida, y por otro, se realiza un aprovechamiento energético generando vapor y agua caliente para el proceso de fabricación. El volumen de residuos que generan estas industrias permite producir electricidad utilizando turbinas de vapor en sistemas de cogeneración.

En el proceso industrial más utilizado habitualmente para obtener pasta de celulosa se emplean productos químicos que permiten la separación de los principales componente de la madera, la lignina y la celulosa. De esta forma se consigue una pasta con una elevada proporción de celulosa de elevada calidad. Para reciclar el papel y cartón que se recoge en nuestras ciudades es necesario mezclarla con pasta "virgen" obtenida en los procesos anteriores, ya que su baja calidad no permite el empleo de la misma de forma independiente.

Las industrias de este sector presentan importantes consumos térmicos que son en parte cubiertos con residuos generados en los propios procesos. Los combustibles más empleados son cortezas, serrines y lejías negras. Las lejías o licores negros representan una parte muy importante del consumo del proceso y, gracias a su combustión, por un

lado se recupera parte de la materia prima mineral contenida, y por otro, se realiza un aprovechamiento energético generando vapor y agua caliente para el proceso de fabricación. El volumen de residuos que generan estas industrias permite producir electricidad utilizando turbinas de vapor en sistemas de cogeneración.

Por ejemplo, en el año 2008 la industria papelera española generó 1,6 millones de toneladas de residuos no peligrosos, en la producción de 8,4 millones de toneladas de papel y en el reciclado de 5,4 millones de toneladas de papel recuperado. De estos residuos, hasta un 90% es biomasa que puede ser valorizado energéticamente, a pesar de lo cual sólo se utilizó con este fin un 1%.

Si atendemos a las fracciones de residuos más importantes, el 85% del total se puede agrupar en cuatro categorías:

- alrededor de un **30%** son desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón
- un **21%** lo forman desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado, obtenidos por separación mecánica
- un **17%** de lodos del tratamiento con una clasificación diferente al anterior. La aplicación preferente de este grupo de residuos es la valorización energética del mismo.
- y un **17%** de lodos de destintado procedentes del reciclado de papel, que aunque puedan valorizarse energéticamente, su composición hace que posean un destino preferente como regenerador de suelos, compost o materiales de construcción.

Teniendo en cuenta la reducida utilización actual de los residuos de este tipo de industrias, es importante resaltar las enormes posibilidades de mejora que existen, tanto en aplicaciones térmicas como eléctricas. En cuanto a las aplicaciones térmicas podemos reseñar las siguientes: la incineración o combustión, el reformado por vapor, la oxidación húmeda, la oxidación supercrítica de agua, la gasificación y pirólisis, y la gasificación por plasma a altas temperaturas. En cuanto a las aplicaciones eléctricas podemos destacar que existen proyectos de cogeneración consistentes en la incineración de la biomasa residual en un ciclo de vapor sencillo.

Según las estimaciones que ha realizado el propio sector, el contenido energético renovable para el total de los residuos del sector de pasta y papel es del 59%. Considerando un PCI medio de 14,6 MJ/kg, la evolución del potencial energético de esta década es el que aparece reflejado en la Tabla I-5.

Tabla I-5. Potencial disponible de los residuos del sector de la industria de la pasta, papel y cartón (Fuente: PER 2011-2020).

AÑO	KTEP	KTEP RENOVABLES	GWhe	GWhe RENOVABLES
2010	588	347	1.710	1.009
2015	673	397	1.958	1.155
2020	780	460	2.269	1.339

2.4 SUBPRODUCTOS DERIVADOS DE INDUSTRIAS DE SEGUNDA TRANSFORMACIÓN

Se consideran industrias de segunda transformación a todas aquellas relacionadas con:

- Carpintería, ebanistería y mueble
- Palets, envases y embalajes de madera
- Traviesas, postes y apeas
- Papel y cartón

2.4.1 Carpintería, ebanistería y mueble

Los procesos de producción de las carpinterías pueden ser de dos tipos en función de la materia prima utilizada: madera maciza o tableros formados por restos de madera, tanto de fibras como de partículas. La madera maciza se emplea, sobre todo, en carpintería exterior, donde los productos finales están sometidos a variaciones de condiciones atmosféricas (I-12a). También se emplea como parte visible de determinados productos de carpintería constituidos por tableros de fibras o de partículas. Ocurre lo mismo en la fabricación de muebles, teniendo procesos de producción y residuos diferentes según se utilice madera maciza o se elaboren a partir de tableros de fibras y/o partículas.

Los residuos generados en este tipo de industrias son de dos tipos, por un lado serrín y polvo, que suele ser almacenado en un silo mediante un sistema de aspiración, y por otros restos de madera y recortes, que se almacenan en contenedores para su gestión posterior. Estos residuos tienen como destino preferente el empleo como materia prima en la industria de tableros, pero el declive sufrido en la misma, en los últimos años, ha propiciado que se empiece a derivar estos residuos hacia un aprovechamiento energético, bien sea térmico o eléctrico. Otras alternativas de menor importancia son su utilización como compost y para cama de ganado.

2.4.2 Palets, envases y embalajes de madera

Estos productos pueden elaborarse a partir tanto de madera maciza como de tableros ya elaborados y toman, según necesidades, una serie de formas y tamaños que determinan los siguientes grupos: envases para frutas y hortalizas, para pescado y marisco, cajas para productos agroalimentarios y estuches, palets para transportes de mercancías de diversos tamaños (Figura I-12b), embalajes diversos que incluyen contenedores, cajas, jaulas, plataformas, etc., y componentes de otros envases como cuadradillos, listones, laterales, tablillas, testeros y fondos. De todo este conjunto de productos, los palets representan aproximadamente el 87% en peso del total, con una producción anual aproximada de 5 millones de toneladas, de las que unas 2,3 millones de toneladas se reutilizan. El 13% de productos restantes, se divide en dos grupos: envases y cajas (que suponen unas 357.000 t), y bobinas, jaulas y embalaje mixto (con unas 385.000 t).

Una vez empleados todos estos envases de madera se consideran residuos y entonces caben tres posibilidades: recuperación, reciclado, o eliminación. La recuperación se realiza fundamentalmente con los palets, llegándose a emplear de nuevo hasta 9-10 veces. Las cajas-palet, jaulas, bobinas, etc. también son recuperables según el estado en que se encuentren, salvo las destinadas a productos alimentarios, cuya reutilización está prohibida por motivos de higiene. El reciclaje consiste en emplear la madera como materia prima para otros productos, tales como tableros aglomerados, briquetas para leña, camas de animales, compost, serrín, etc. Y por último, la eliminación se realiza cuando el residuo generado es pequeño o no existe ningún reciclador en las cercanías, por lo que los residuos terminarán en algún vertedero controlado o serán incinerados. Como dato orientativo, solamente un 4% del millón de toneladas de residuos de envases de madera generados en el año 2001 se destinaron a valorización energética.



Figura I-12. a) Madera maciza utilizada en carpintería exterior; b) palets de madera

2.4.3 Traviesas, postes y apeas

La reutilización de productos de madera es muy deseable, sobre todo teniendo en cuenta que es un bien valioso y escaso, y que su permanencia en la cadena de consumo permite reducir el nivel de CO_2 en la atmósfera. Cuando estos productos de madera han recibido un tratamiento para prolongar su durabilidad a la intemperie, como es el caso de apeas, traviesas de ferrocarril o postes, es necesario eliminar o sellar el producto de impregnación para eliminar o minimizar los posibles efectos negativos que su contacto continuado con la piel pueden acarrear.

Si la opción elegida es su valorización energética, también es importante tener en cuenta la peligrosidad de las sustancias que impregnan la madera antes de permitir su liberación a la atmósfera mediante la incineración. A este respecto podemos considerar dos tipos de procesos, los que tratan y controlan las emisiones de los compuestos generados en la combustión de la madera (**valorización energética controlada**) y aquellas en las que no se realiza ningún control (**valorización energética convencional**). Debido a la peligrosidad potencial de las sustancias impregnadas en la madera, para la valorización energética de estos residuos solo se aconseja el proceso controlado, ya que sólo así es posible evitar que escapen a la atmósfera sustancias peligrosas persistentes que se pueden formar, entre los que se encuentran

compuestos orgánicos aromáticos y halogenados, así como la posibilidad de que el arsénico y el cromo contenido en la madera se volatilicen durante la combustión debido a su baja temperaturas de ebullición.

2.4.4 Industria del papel y del cartón

La producción de papel (Figura I-13b) y cartón, aunque se considera un producto obtenido a partir de las industrias de segunda transformación, se realiza habitualmente en las mismas plantas en las que se produce la pulpa o pasta de celulosa (primera transformación), que es la materia prima con la que se elaboran estos productos. Por este motivo, el aprovechamiento energético de los residuos ya se ha tratado en el apartado 3.3 relativo a la industria de pastas celulósicas.



Figura I-13. a) Traviesas de ferrocarril y b) industria papelera

2.5 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AIDIMA, ITENE. 2010. Estudio de prospectiva sobre nuevos desarrollos energéticos basados en biomasa y residuos industriales de los procesos de fabricación de la industria del papel. Ed. FEDIT, ASPAPEL. Madrid. 211 pp.

ASPAPEL. 2007. Diagnóstico de la generación y gestión de residuos sólidos en la industria papelera español. Ed. ASPAPEL. Madrid. 25 pp.

ASPAPEL. 2008. Guía de gestión de residuos (pasta, papel y cartón). Ed. ASPAPEL. Madrid. 109 pp.

Bláquez D, del Olmo Marta 2012. Manual de eficiencia energética para pymnes. 10 Industria de la madera y el corcho. CNAE 16. Ed. Gas Natural Fenosa.

Castells XE. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ed. Díaz de Santos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Madrid, 1254 pp. ISBN: 84-7978-694-9

Enciso E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. Ed. ASEMFO (Asociación Nacional de empresas forestales) y Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 38 pp.

FAO 2000-2002. Guía para encuestas de demanda, oferta y abastecimiento de combustibles de madera. Programa de asociación comunidad Europea-FAO (2000-2002). Programa de manejo forestal sostenible (*http://www.fao.org/DOCREP/005/Y3779S/Y3779S00.HTM*).

Hakkila P. 2004. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Technology Programme Report 6/2004 Final Report. Tekes, National Technology Agency. Helsinki. 99 pp. ISBN 952-457-151-X.

IDAE 2007. Energía de la Biomasa. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 140 pp.

IHOBE. 2005. Inventario y caracterización de residuos de madera tratada en la comunidad autónoma del País Vasco. Edita IHOBE S.A. Vitoria. 36 pp. ISBN: VI-353-05.

Margarit J (Coord). 2011. Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio Técnico PER 2022-2020. IDAE. Madrid. 196 pp.

Redacción Ambientum. 2004. Envases de madera. Suelos y residuos. Revista on-line de medio ambiente *Ambientum.*

RESA: Armengol Grau, Oriol Farré. 2011. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020. Coordinación y revisión IDAE: Julio Artigas, Miguel Rodrigo. Madrid. 132 pp.

Tolosana E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de Biomasa Forestal. Ed. FUCOVASA y Mundi-Prensa. 384 pp. ISBN: 978-84-8476-383-3.

3 BIOMASA AGRÍCOLA Y RESIDUOS DE INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Se considera residuo a todo aquel material generado en la actividad humana que no posee valor económico. Los residuos agrícolas poseen una gran heterogeneidad, lo que repercute enormemente en su utilización como combustible.

Los residuos agrícolas más representativos son los procedentes de cultivos herbáceos, como la paja de los cereales, restos de cultivos hortícolas o restos de cultivos industriales (oleaginosos, algodón, tabaco, etc…) y los procedentes de cultivos leñosos como los restos de podas de viñas u olivos o del levantamiento de cultivos (plantas viejas, enfermas, tocones, etc…). Por tanto, clasificaremos la biomasa agrícola en material procedente de:

- **Restos herbáceos de cultivos agrícolas**: procedentes principalmente de cereales y cultivos hortícolas.
- **Restos leñosos de cultivos agrícolas**: generados básicamente por olivo, vid y frutales.
- **Residuos de industrias agroalimentarias:** generados principalmente por los sectores vinícola, olivero y de la producción de frutos secos.

En la Tabla I-6 aparecen las características energéticas en términos de poder calorífico (superior e inferior) para diferentes restos agrícolas herbáceos y leñosos según IDAE 2008 y Eumedia Redacción 2009.

Tabla I-6. Caracterización energética de residuos agrícolas

RESIDUOS	MJ/kg materia seca	
	PCS	PCI
Paja de trigo	18,6	17,2
Paja de centeno	18,6	17,2
Cascarilla de arroz	17,0	15,8
Residuo de maíz	18,4	17,1
Almendro	18,9	17,6
Olivo	19,5	18,1
Sarmiento	19,2	17,9
Plátano de sombra	19,1	-

3.2 RESIDUOS DE ORIGEN HERBACEO

No todo el residuo existente está disponible y es utilizable para usos energéticos, ya que en algunos casos, resulta más interesante dejarlo en el campo por motivos económicos o medioambientales, y en otros casos, ya se está valorizando en otros usos no energéticos.

La cantidad de residuo de un cultivo se puede estimar a partir de su producción comercial (kg residuo/kg producción) (Tabla I-7). En cada cultivo existe una variabilidad en función de la variedad utilizada y el sistema de cultivo (secano o regadío).

Tabla I-7. Producción de residuos de algunos cultivos herbáceos (Fuente: IDAE 2008)

CULTIVO AGRÍCOLA	Kg residuo/Kg producto
Trigo, cebada, avena	0,6-1,3
Centeno	1,0-1,5
Maíz	0,8-2,0
Arroz	0,5-1,0
Sorgo	1,0-2,0
Girasol	0,7-2,0
Hortícolas	Muy variable

Además, es necesario tener en cuenta que el suelo necesita incorporar materia orgánica para mantener o incrementar su fertilizad, por tanto, no se debe exportar la totalidad de los residuos. También los residuos tienen un importante papel en la lucha contra la erosión.

Por otro lado, se deberán conocer los usos alternativos que tiene el recurso que se desea evaluar. Por ejemplo, la paja de cereal de invierno disponible, en un año normal, puede ser del orden del 40-45% pues el resto se comercializa fuera del sector: champiñonerías, piensos, papeleras, ganadería, etc., o se autoconsume para alimentación animal o camas para el ganado. Estos porcentajes de disponibilidad varían de unas zonas geográficas a otras.

3.2.1 La paja de los cereales

La paja de los cereales no solo se ha utilizado a lo largo de los siglos como alimento para los animales sino que también ha sido, junto con la leña y el carbón vegetal, el combustible sólido por excelencia. Actualmente su uso se contempla en centrales térmicas para generar energía eléctrica y calor (Tabla I-8 y Figura I-14). Estos usos han encontrado siempre el problema de la estacionalidad, ya que la producción de paja es mucho mayor los años lluviosos que cuando hay sequía, por lo que es difícil establecer la cantidad de paja disponible y su precio.

Tabla I-8. Características de 3 plantas de biomasa por combustión de paja de cereales (Fuente: http://www.acciona-energia.es/areas_actividad/biomasa.aspx)

	Miajadas	Briviesca	Sangüesa
Situación	Cáceres	Burgos	Navarra
Potencia	16 MW	16 MW	25 MW
Materia prima	110.000 t/año	102.000 t/año	160.000 t/año
Empleos	100 directos y 75 indirectos	25 directos y 70 indirectos	100 directos e inducidos
Puesta en marcha	2010	2010	2004
Promotora	ACCIONA	ACCIONA Y EREN	ACCIONA



Figura I-14. Planta de biomasa de combustión de paja de cereal en Briviesca (Burgos) (Fuente: http://www.acciona-energia.es)

3.2.1.1 Propiedades físicas

3.2.1.1.1 Forma, tamaño y aspecto

La forma de la paja es cilíndrica, alargada y de un diámetro muy pequeño en relación a la longitud. Su color es amarillento, gracias a elementos como azufre, calcio, cloro, potasio y silicio, y se degrada a colores más blanquecinos con el tiempo (Figura I-15a). Si posee tonos rojizos es debido al hierro.

3.2.1.1.2 Densidad

Uno de los inconvenientes del empleo de la paja de cereal como combustible es su baja densidad, por lo que para abaratar el transporte, tanto a la planta de almacenaje, como de ésta a la central, tras su recolección, se compacta y empaca en pacas de forma cilíndrica o prismática (Figura I-15b).

3.2.1.1.3 Humedad

En general, la humedad de la paja es baja si se deja secar en campo, lo cual se consigue si se realiza su recogida en los meses de verano. Si nos referimos a restos de maíz, que se recogen en otoño-invierno, es preciso un secado forzado, ya que su humedad es mayor. El secado se realizará antes de su empacado.



Figura I-15. a) Aspecto de paja de cereal y b) pacas cilíndricas.

3.2.1.2 Propiedades químicas

3.2.1.2.1 Composición química

La composición química de la paja es variable y dependerá del cereal considerado, de las características químicas del suelo y de los fertilizantes empleados durante el cultivo. Por otro lado, la cantidad y distribución de las precipitaciones anuales, favorecen diferentes reacciones químicas alterando la composición química de la paja.

Aunque la paja es un material primordialmente lignocelulósico, contiene otros elementos químicos como azufre, calcio, cloro, potasio y silicio. La mayoría de ellos provocan problemas de corrosión en los tubos de escape de gases o los intercambiadores de calor (ej. óxido de azufre, gases derivados del cloro), o ataques en las parrillas y paredes de las calderas (ej. cenizas fusibles de potasio o silicio).

Por estos motivos, la combustión de paja no es sencilla y hay que controlar con detalle las temperaturas de combustión y la proporción aire/paja.

3.2.1.2.2 Poder calorífico

Depende de la especie, del tipo de suelo, de los fertilizantes empleados y, sobre todo, de la humedad. Como dato general orientativo, la paja puede presentar una productividad media de 3 t/ha y un PCI de 17,15 MJ/kg m.s.

Las labores de siega y recolección para biomasa agrícola herbácea destinada a aprovechamiento energético son los mismos que los utilizados para la recolección de los cultivos herbáceos destinados a la alimentación humana o animal.

3.2.2 Restos hortícolas

Aunque los residuos hortícolas se presentan como una de las fuentes de energía renovable más importantes para el futuro en aquellas zonas donde se generan grandes cantidades, estos sub-productos presentan una serie de limitaciones que dificultan su valorización energética:

- **Poseen altos contenidos de humedad**, lo que reduce enormemente el poder calorífico del residuo en relación a otras materias primas (Tabla I-9).
- **Plantean problemas de suministro** debido a la estacionalidad de la generación de los residuos.
- **Provocan contaminaciones y corrosiones durante el proceso de combustión**. Los compuestos inorgánicos de la biomasa (potasio, sodio, fósforo, calcio, magnesio y en particular el azufre y el cloro) están implicados en el deterioro de hornos e instalaciones.

Aún así, proliferan los experimentos relacionados con la valoración energética de este sub-producto en nuestro país, ya que determinadas zonas como Almería, producen casi un millón de toneladas (peso fresco) de residuos al año, a partir de las casi 26.000 ha de invernaderos que poseen. Según Callejón-Ferre et al. (2011), estas toneladas de

residuos poseen un potencial energético de 1 millón de MWh/año, lo que podría abastecer a 120.000 hogares.

Tabla I-9. Parámetros energéticos de 8 hortalizas que producen más residuos por unidad de superficie en Almería (Fuente: Callejón-Ferre et al. 2011 y http://www.slideshare.net/MorganAqua/gcbiomass-biomasa)

ESPECIE	(MJ/kg)	CENIZAS (% m.s)	HUMEDAD (%)	S (mg/kg)	Cl (mg/kg)
Calabacín	14,9	3,42	93,04	4,7	31,4
Pepino	14,6	3,5	89,36	5,6	37,0
Berenjena	19,6	2,65	83,64	14,6	96,8
Tomate	17,5	3,04	89,54	9,7	64,0
Alubias	20,7	2,88	85,52	5,0	32,9
Pimiento	18,0	3,56	80,91	14,8	98,2
Sandía	16,7	3,08	90,84	10,0	66,2
Melón	15,7	3,21	91,85	13,6	89,9

Por otro lado, recientes investigaciones sobre el potencial de producción de biogás derivado de la combinación de purines y destríos de diferentes especies de hortalizas y de frutas (co-digestión anaerobia) señalan que la adición de residuos de pimientos y tomates a los purines incrementan en más de un 40%, y casi en un 28% en el caso de residuos de melocotón, la producción de metano en comparación con las digestiones realizadas únicamente con purines. Estos datos esperanzadores alientan la realización de pruebas en digestores a mayor escala y de manera continua, lo que permitiría realizar una valorización energética de estos residuos hortícolas.



Figura I-16. Residuos de cultivos hortícolas

3.3 RESIDUOS DE CULTIVOS LEÑOSOS

Según IDAE 2008 la evaluación de este recurso se puede realizar en función de la superficie destinada al cultivo, y más concretamente el número de árboles por unidad

de superficie. La Tabla I-10 muestra cifras orientativas en kg/año y árbol para los cultivos más comunes:

Tabla I-10. Producciones de residuos leñosos por árbol y año (Fuente: IDAE 2008)

CULTIVO	KG RESIDUO/ ÁRBOL Y AÑO
Frutales de hueso y pepita	2,5
Cítricos	2
Almendro	3
Olivar	8
Viñedo	0,5-1

Actualmente, y en general, los residuos agrícolas leñosos apenas tienen aprovechamiento con valor de mercado, a pesar de que conllevan un coste inevitable para el agricultor, dada la necesidad de retirarlos o de picarlos para facilitar el tránsito y el laboreo de las parcelas. A continuación, se aportan datos útiles para los más importantes a nivel nacional:

3.3.1 Poda de la vid

La poda de la vid se realiza todos los años durante el invierno (diciembre-marzo), obteniéndose, aproximadamente, entre 900 y 1.200 kg/ha en peso húmedo de restos de poda en secano y regadío respectivamente. Recién efectuada la poda (Figura I-17), el contenido en humedad de los sarmientos se encuentra próximo al 40%, aunque tras un secado natural de los residuos, se podrían obtener valores comprendidos entre el 10 y 20%.

Este residuo, posee de media un poder calorífico superior e inferior de 19,2 y 17,9 MJ/kg m.s., según muestra la Tabla I-6.

La poda del viñedo se realiza anualmente y de forma manual, o combinando una pre-poda mecanizada con poda manual. Posteriormente se apilan (o empacan Figura I-18a) y recogen los sarmientos, generalmente con maquinaria móvil a la que se le implementan sarmentadores hidráulicos o autocargadores. El sarmiento de la vid, dada su escasa humedad (20% en base húmeda), se apila directamente en los parques de almacenamiento.



Figura I-17. a) Sarmientos de vid y b) poda de olivo

3.3.2 Poda del olivo

El olivar destinado a aceituna de mesa debe ser podado cada año, mientras que el destinado a la obtención de aceite de oliva se poda cada dos años. Este tratamiento se realiza a comienzos de la primavera, entre los meses de marzo y abril, y con él se pueden obtener, de media, unas 3 t/ha.año. La humedad en el momento de la poda se sitúa en torno al 25%, alcanzando valores entre 10 y 20% tras el secado natural con un PCI de 18,1 MJ/kg.

En el caso del olivo**,** el proceso de obtención de la biomasa procedente de sus residuos de poda es similar al de la vid. Posteriormente, la gestión de los residuos puede realizarse o mediante el triturado y recogida en campo de éstos (Figura I-18b), a través de su empacado para su posterior envío a planta, o realizando un hilerado del ramón con máquina hileradora en montones de 1,5 m de anchura y 1 m de altura para facilitar su posterior recogida.



Figura I-18. a) Rotoempacadora para sarmientos y restos de poda (http://www.interempresas.net) y b) recogida del picado de restos de poda (http://www.agroterra.com)

3.3.3 Poda de otros frutales

El melocotonero es una de las especies sobre las que se realiza una poda más intensa. Esta se realiza en invierno (enero-febrero) y puede generar hasta 1.200 y 2.000 kg/ha de leña con unos contenidos de humedad próximos al 35%.

La poda del almendro se realiza entre los meses de noviembre y febrero. Sus producciones de leña son menores que las del melocotonero al ser una especie de secano, alcanzando 3 kg por árbol (Tabla I-10) lo que se traduce en producciones de entre 700 y 1.000 kg/ha con contenidos de humedad próximos al 30%.

Se estima que los poderes caloríficos inferiores que alcanzan estos frutales superan los 17 MJ/kg.

3.3.4 Poda de árboles en jardinería

Dentro de los residuos de jardinería se engloban los restos de poda que, si bien no son los más numerosos, sí suponen un problema importante para los gestores de las zonas verdes municipales ya que su eliminación tradicional mediante transporte e incineración en vertedero supone un elevado coste y un aporte gratuito de CO_2 a la atmósfera.

El plátano de paseo (*Platanus* x *hispanica*) es probablemente la especie más utilizada para el arbolado de alineación en las calles de nuestras ciudades, según muestran los datos de Ayuntamientos como el de Madrid, Barcelona o Cáceres (Eumedia Redacción 2009), con una representación sobre el total de las especies del 24,44%, 32,16% y 13% respectivamente. Entre estos otros árboles caben señalar las siguientes especies: *Celtis australis*, *Catalpa bignoniodes*, *Morus nigra*, *Tilia* spp., *Melia azedarach*, etc… Como puede observarse en la Tabla I-11, el plátano de sombra es la especie que contiene unos porcentajes de humedad y de cenizas más bajos respecto al resto de especies consideradas. Así mismo, el plátano de sombra posee un poder calorífico superior de 19,1 MJ/kg m.s (Tabla I-6), comparable con el de restos como el de las podas de olivo y los sarmientos de vid. Por tanto, se puede concluir que la especie más importante de los árboles de alineación podría resultar una fuente abundante de restos de poda destinados a la producción de biocombustibles de buena calidad.

Tabla I-11. Contenido en humedad y en cenizas para distintas especies de arbolado ornamental y diversos diámetros de madera (Fuente: Eumedia Redacción 2009)

ESPECIE	DIAMETRO (cm)	HUMEDAD (%)	CENIZA (%)
Platanus* x *hispanica	1-3	5,28	3,3
Catalpa bignoniodes	2-3	10,7	3,1
Celtis australis	<1	10,5	8,0
Morus nigra	2-3	7,9	4,4
Melia azedarach	2-3	15,2	4,5



Figura I-19. Restos de poda en plantaciones lineares de ciudad

3.4 RESIDUOS DE INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS

Entre las industrias agroalimentarias y agrícolas que producen residuos susceptibles de utilizarse con fines energéticos pueden señalarse las industrias de conservas vegetales (huesos de frutas), las productoras de vinos y aceites (orujos) y las que elaboran frutos secos (cáscaras). Sin embargo, hay que indicar que un alto porcentaje de los residuos generados por estas industrias suele tener aplicaciones en otras industrias.

3.4.1 Biomasa del sector vinícola: Orujos y Lías

A lo largo del proceso necesario para la elaboración del vino (Figura I-21 para el vino tinto) existen varios pasos a partir de los cuales se obtienen residuos potencialmente utilizables como combustible: Raspones, pastas de orujo y heces y lías, aunque de todos ellos, el principal subproducto de la industria vitivinícola es el orujo de uva, constituido por restos de raspón, piel y semillas de uva. La pasta de orujo resultante del proceso, se utiliza en ocasiones como combustible en calderas de las alcoholeras, con un poder calorífico de 15,9 MJ/kg m.s y una humedad aproximada de un 13%.

Una vía alternativa de aprovechamiento industrial del mismo consiste en la extracción del aceite contenido en las granillas o semillas de uva. Esta actividad se realiza ya en la actualidad, aunque de forma muy limitada, siendo posible encontrar aceite de semilla de uva en algunas tiendas dedicadas a la dietética.

Otro subproducto de la industria vitivinícola que se produce en grandes cantidades es el denominado lías o heces del vino. Este subproducto se obtiene en el proceso de desfangado del vino que se realiza una vez concluida la fermentación del mosto, y está formado, principalmente, por restos de levaduras muertas, tartratos y materiales de alto peso molecular presentes inicialmente en el mosto y que precipitan al aumentar el contenido de alcohol en el mismo. La principal utilización, en la actualidad, de este subproducto consiste en su destilación para la obtención de alcohol vínico. No obstante, el elevado contenido en tartratos y proteínas que presenta este material nos sugiere nuevas vertientes para su aprovechamiento que en la actualidad no están suficientemente explotadas.



Figura I-20. Extracción de orujo agotado procedente del descube y residuos de heces y lías (Fuente: http://urbinavinos.blogspot.com.es y http://largarita.blogspot.com.es)

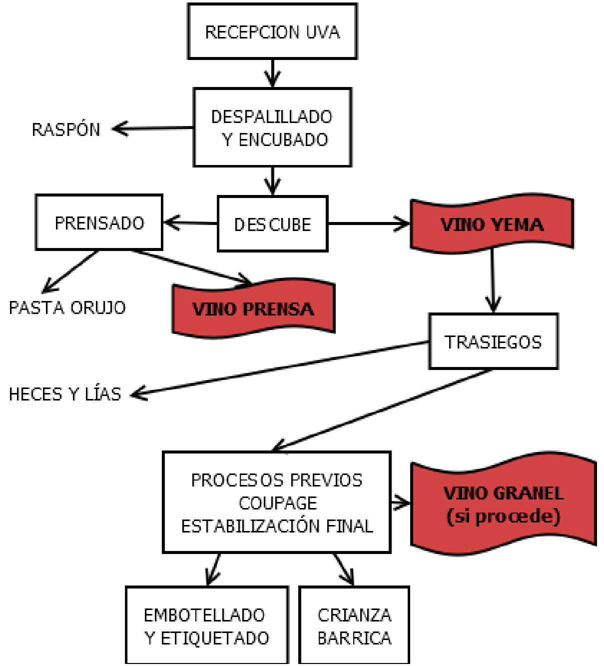


Figura I-21. Esquema básico del proceso de obtención de vino tinto (Fuente: Elaboración propia)

3.4.2 Biomasa del olivar: Orujo, Orujillo y Huesos de aceituna

El cultivo del olivo y sus industrias derivadas generan una serie de subproductos a partir de los cuales, y con una tecnología adecuada, pueden proporcionar tanto energía térmica como eléctrica, incluyendo bioetanol (Figura I-22).

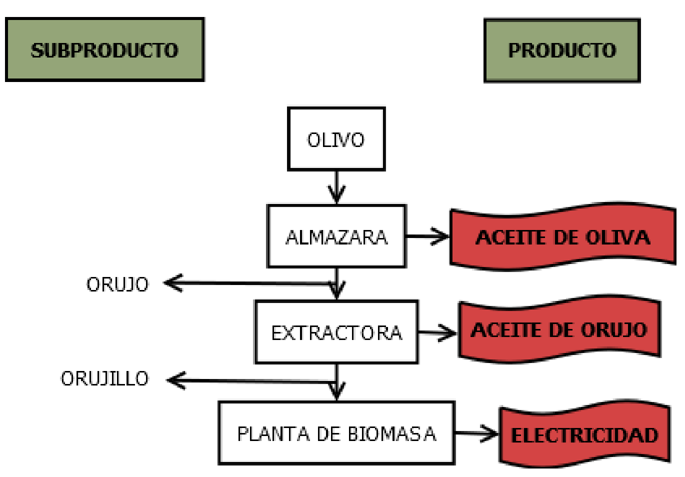


Figura I-22. Esquema del proceso de obtención de aceite, orujo y orujillos

3.4.2.1 Orujo

El proceso de obtención del aceite de oliva en las almazaras, principalmente por centrifugación y en número más reducido por prensado, genera como subproducto el orujo. Por cada tonelada de aceituna procesada se obtiene aproximadamente 0,2 t de aceite de oliva y 0,8 t de orujo, por lo que en términos generales, en España se producen casi 3 millones de toneladas al año con una humedad aproximada del 60-65%. Este orujo se almacena en balsas y posteriormente o se le somete a una segunda centrifugación (también llamada repaso) o se le practica un proceso químico en una extractora, obteniéndose aceite de orujo.

Una opción a esta extracción es destinar el orujo repasado a la producción de energía eléctrica, previo secado hasta alcanzar una humedad del 40%. Por ejemplo, alrededor de un 30% del orujo generado en Andalucía se somete a este proceso.

3.4.2.2 Orujillo

El orujo, una vez secado y sometido al proceso de extracción de aceite, se transforma en orujillo. Se trata de un subproducto con una humedad en torno al 10-12% que tiene unas buenas propiedades como combustible, con un poder calorífico de unas 17,6 MJ/kg, y que carece prácticamente de azufre (0,05-0,1%) y otros contaminantes. Es un subproducto denso, y puede utilizarse tanto para generación de energía térmica en industrias como para generación de energía eléctrica. Por ejemplo, en Andalucía, en una campaña media se generan unas 684.000 t/año de orujillo. En el año 2010 existían al menos 8 plantas de generación de energía eléctrica con orujillo en esta región y en Castilla la Mancha (Figura I-23), con una potencia total superior a los 67 MW, lo que supone una capacidad de consumo de 422.000 t/año. El resto, 262.000 t/año, estarían disponibles para consumo térmico.



Figura I-23. Parque de orujillo en Villarta de San Juan (Ciudad Real) y huesos de aceituna almacenados

Una parte del orujillo generado en las extractoras se autoconsume en la propia instalación, tanto en el secado del orujo como en calderas para generación de

vapor para el proceso. En algunos casos, y de forma cada vez más frecuente, el secado en las extractoras se realiza mediante cogeneración con gas natural, lo que supone una fuente de ingresos adicional por venta de la energía eléctrica producida. La cogeneración implica un menor autoconsumo de orujillo en la extractora, quedando disponible para otros usos.

3.4.2.3 Hueso de aceituna

El hueso de aceituna triturado constituye una fuente energética con aplicaciones en calderas de biomasa domésticas e industriales. La aceituna está compuesta por un 85% de pulpa y un 15% de hueso. Se trata de un tipo de subproducto que procede directamente del proceso de molienda de las olivas en las almazaras o del hueso generado en las industrias de aderezo de aceituna de mesa (Tabla I-12). Sus características como combustible son excelentes, ya que posee una elevada densidad, una humedad que se aproxima al 15%, una granulometría muy uniforme y un poder calorífico en torno a 18,8 MJ/kg en base seca.

Tabla I-12. Producción de residuos de hueso de aceituna en función de la industria

TIPO DE INDUSTRIA	DESHUESO (%)	PESO GENERADO (t/año)
Aderezo	50	22.500
Obtención aceite oliva	100	370.000

Tradicionalmente este residuo se ha utilizado en calderas de industrias del olivar, tanto almazaras como extractoras, así como en otros sectores como el cerámico, granjas, etc. En la actualidad cada vez están cobrando más importancia los usos en el sector doméstico y residencial para suministro de agua caliente sanitaria y calefacción. La tecnología ha experimentado un gran avance, importándose en la actualidad equipos con muy alto rendimiento y bajos niveles de emisiones. Para facilitar el acopio de combustible se está comenzando a comercializarse el hueso en sacos de 15 kg, de fácil distribución y manejo, óptimo para su uso en el sector doméstico, y con un precio considerablemente menor al de otros combustibles de similares prestaciones, como los pélets de madera.

3.4.3 Cáscaras de frutos secos y Cascarilla de arroz

3.4.3.1 Cáscaras de frutos secos

Las cáscaras de almendras (Figura I-24a) y las de avellanas tienen el suficiente poder calorífico (PCI=15,5 MJ/kg), densidad (>400 kg/m^3) y humedad (10-15%) como para que sean utilizadas en calderas especiales denominadas policombustibles, que consumen casi cualquier tipo de residuo vegetal.

Asimismo existen recientes iniciativas en las que se está utilizando la cáscara de almendra como materia prima exclusiva para la fabricación de briquetas, como la realizada por la corporación valenciana de energías renovables COVAERSA (http://www.briquetasbriec.es). Estas briquetas poseen altos poderes caloríficos (19,7 MJ/kg) y bajos niveles de humedad (2%), y según las especificaciones técnicas del

producto, 1 kg de briqueta equivaldría a 1,7 kg de madera, o 1 briqueta de 2,2 kg lo haría a 1 litro de gasoil.

3.4.3.2 Cascarilla de arroz

La cáscara de arroz (Figura I-24b) es un resido agrícola que también puede ser utilizado como materia prima para la generación de energía debido a su elevado contenido energético (PCI=17,6 MJ/kg para un contenido de humedad de un 10%). Hoy en día, la mayor parte del excedente de cáscara de arroz (se estima que el 20% del arroz es cáscara), se destruye o se elimina por medio de la combustión a cielo abierto, lo que resulta en pérdidas de energía, así como la emisión de contaminantes hacia la atmósfera. En España se producen más de 700.000 toneladas de arroz al año a partir de 40.000 ha de cultivo.



Figura I-24. a) Cáscara de almendra y b) almacén de cascarilla de arroz (Fuente: http://www.ecologiablog.com)

3.4.4 Otros residuos de las industrias de transformación agrícola

Existen gran cantidad de industrias de transformación agrícola que generan residuos derivados de su proceso productivo que, a priori, pueden ser utilizados como combustibles. A continuación, se relacionan algunos de estos residuos:

3.4.4.1 Residuos de la industria del café

Los tostaderos de café generan cascarilla que generalmente se incinera como combustible en la propia planta. Esta cascarilla constituye el 4,2% en peso del fruto. La producción mundial de café en el año 2010 ascendió a más de 8 millones de toneladas, principalmente en Brasil (36,4%), Vietnan (14%) y Colombia (6,9%), lo que da lugar a más de medio millón de toneladas de cascarilla al año, que de media, posee un poder calorífico inferior de 17,8 MJ/kg.

Por otro lado, las empresas productoras de café soluble generan un residuo tras la extracción de los granos de café tostado y molido. Este producto se utiliza como combustible, como componente de piensos para animales, para el cultivo de setas o como abono orgánico o también como componente de sustrato de cultivo.

3.4.4.2 Residuos de la industria textil

Los residuos textiles principales proceden del algodón o del lino. El subproducto del algodón consiste en fibras cortas, semillas y restos de hoja. El residuo del lino genera el polvo de telar que se obtiene del tallo en el proceso de fabricación de las fibras. La mayor parte de estos residuos se destinan a vertedero o son quemados en la propia industria para la obtención de energía. Si se someten a un proceso de compostaje, estos materiales pueden ser utilizados en la formulación de sustratos de cultivo.

3.5 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA. 2008. Situación de la Biomasa en Andalucía. Consejería de innovación, ciencia y empresa. Junta de Andalucía.

Callejón-Ferre AJ, Velázquez-Martí B, López-Martínez JA, Manzano-Agugliaro F. 2011. Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:948-955

Camps M, Marcos F. 2008. Los biocombustibles. Mundi-Prensa, Madrid. 384 pp. ISBN 978-84-8476-360-4

Eumedia Redacción. 2009. Aprovechamiento de residuos de poda de árboles de alineación como biocombustible sólido. *Vida Rural* 285.

Fernández JM. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. AMV Ediciones, Madrid. 319 pp. ISBN 978-84-96709-62-1

Fernández N. 2010. Plantas de Biomasa. RENOVETEC.

IDAE. 2008. BIOMASA. Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 60 pp.

PBCyL. 2010. Plan Regional de Ámbito sectorial de la bioenergía de Castilla y León. Ed. Junta de CyL, EREN e ITACyL.

PER 2011-2020. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España

Torres AG, Cambra M, Moset V, Ferrer P. 2011. Valoración energética de purines mediante co-digestión anaerobia con subproductos agrícolas. *Agrónomos*. 41:29-33.

Valverde G, Sarria L, Monteagudo JP. 2007. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Sciencia et Technica*. 37:255-260.

4 CULTIVOS ENERGÉTICOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Se define cultivo energético como todo cultivo no alimentario destinado a la producción de energía y que se utiliza fundamentalmente para la producción de los siguientes productos energéticos:

- **Energía térmica y eléctrica** producida a partir de biomasa.
- **Biocarburantes** (bioetanol, biodiésel, biogás, biometanol, biometiléter, bioETBE, bioMTBE, biocarburantes sintéticos, biohidrógeno, aceite vegetal puro, etc.).

Estos cultivos ofrecen la posibilidad de controlar el coste de producción y la rentabilidad del cultivo, aunque la producción es estacional y es necesario almacenar la biomasa para garantizar el suministro.

Independientemente de si se trata de cultivos herbáceos o leñosos, las principales características que debería presentar un buen cultivo energético son las siguientes:

- **Balance energético positivo**, es decir, que se extraiga de ellos más energía que la que se invierte en su cultivo y su puesta en planta de energía.
- **Especies de crecimiento rápido con una elevada eficiencia fotosintética**. Preferentemente perennes, con capacidad de rebrote a partir de rizomas, tubérculos o de pies después de una corta anterior.
- **Manejo fácil** y que requieran técnicas y maquinarias lo más conocidas y comunes posible entre los agricultores.
- **Rentables** para el agricultor, económicamente hablando.
- **Altos niveles de productividad en biomasa con bajos costes de producción**. La biomasa aprovechable debe estar situada en la parte aérea del vegetal y debe adecuarse a los fines para los que va a ser utilizada.
- **No contribuyan a degradar el medio ambiente** (empobreciendo el suelo) y que permitan la fácil recuperación de la tierra, para implantar posteriormente otros cultivos en algunos casos.
- **Ciclos vegetativos lo más largos posible** y que abarquen desde la primavera temprana hasta el final de otoño, retornando entonces los nutrientes del vegetal que entren en período de dormancia.
- **Adaptados a las condiciones edafo-climáticas del lugar de implantación**. Durante el invierno, las partes que permanecen en el suelo deben ser capaces de resistir las heladas y las bajas temperaturas (=robustez).
- **Resistentes a las plagas, a la sequía y que posean una alta eficiencia en la utilización del agua**. Además, las especies energéticas deben ser muy competitivas con las malas hierbas a fin de ahorrar costes en pesticidas y evitar la contaminación del suelo, agua y atmósfera.

4.2 CLASIFICACIÓN

Los cultivos energéticos poseen varias clasificaciones atendiendo a diferentes factores:

4.2.1 Composición y aprovechamiento final de la biomasa

4.2.1.1 Cultivos oleaginosos

Especies herbáceas o leñosas anuales o plurianuales cuya semilla será destinada a la producción de biodiesel. Es el caso del girasol, colza, soja, jatrofa, lino, etc.

4.2.1.2 Cultivos alcoholígenos

Especies herbáceas utilizadas para la producción de bioetanol a partir de procesos de fermentación de azúcares simples. Es el caso de la remolacha, caña de azúcar, sorgo dulce, pataca (*Heliantus tuberosus*), etc.

4.2.1.3 Cultivos amiláceos y/o inulínicos

Especies herbáceas utilizadas para producir bioetanol a partir de la fermentación de los azúcares, pero mediante una hidrólisis previa de sus azúcares complejos para convertirlos en azúcares más simples. Es el caso de los cereales, como el trigo, cebada y maíz dulce principalmente, y la patata en el caso de cultivos inulínicos.

4.2.1.4 Cultivos lignocelulósicos

Especies leñosas cultivadas en densidades altas y rotaciones cortas (chopo, sauce, eucalipto, paulownia, acacia, etc.), y especies herbáceas con alto contenido en celulosa y de alta producción (cardo, miscanto, panizo o switchgrass, sorgo papelero, etc.). Estos cultivos lignocelulósicos se pueden utilizar tanto para producir biocarburantes de segunda generación como para producir energía eléctrica o térmica.



Figura I-25.- Girasol (oleaginoso); caña de azúcar (alcoholígeno); maiz (amiláceo); cardo (lignocelulósico)

A partir de cada grupo de estos cultivos, y mediante los procesos que se relacionan en la Figura I-26, se obtendrán distintos tipos de biocombustibles:

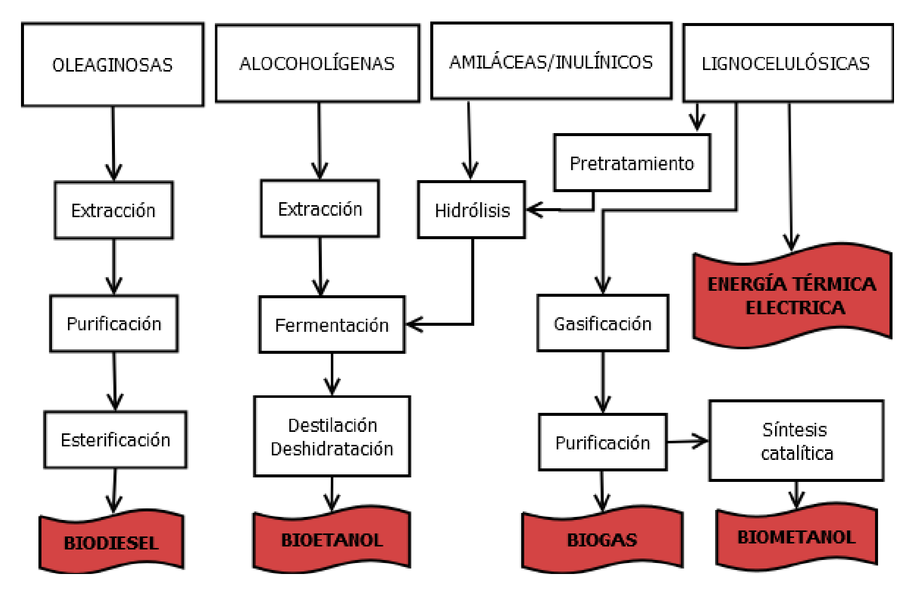


Figura I-26. Diferentes biocombustibles originados a partir de distintos tipos de cultivos energéticos.

4.2.2 Cultivos tradicionales y nuevos cultivos

4.2.2.1 Cultivos tradicionales

Cultivos sembrados fundamentalmente con fines alimentarios pero que se pueden destinar a la producción de biocombustibles, tales como cereales (cebada, trigo, centeno, avena, triticale y/o maíz), girasol y/o colza.

4.2.2.2 Nuevos cultivos

Cultivos que no se utilizan hoy en día para alimentación y que, en muchos casos, están siendo desarrollados actualmente, o se están implantando en distintos países, con la finalidad de producir biomasa. Como ejemplos pueden citarse cultivos como la pataca, sorgo papelero, cardo, miscanto, el switchgrass o la jatrofa entre otros.



Figura I-27. Trigo y colza (cultivos tradicionales); jatrofa y sorgo (nuevos cultivos)

En España, el desarrollo de los cultivos energéticos está siendo muy lento, especialmente si se compara con otros países europeos como Suecia, Finlandia, Austria, Dinamarca, Italia, Alemania o Francia que están apostando firmemente por la

bioenergía a través de medidas legislativas y de concienciación ciudadana, y con el apoyo de iniciativas industriales.

4.3 FACTORES EDAFO-CLIMÁTICOS ADECUADOS PARA EL CULTIVO DE CULTIVOS ENERGÉTICOS HERBÁCEOS Y LEÑOSOS

Antes de establecer un cultivo energético se debe comprobar, que el terreno cumpla unos requisitos mínimos de aptitud (climática y edáfica) que permitan el adecuado crecimiento de la especie. A continuación, se relacionan los más importantes:

4.3.1 Características del suelo

Se conocerán a partir del análisis de muestras obtenidas mediante calicatas o barrenas. Los factores más frecuentes que se determinan en los análisis de suelos y que deberán ser considerados son los siguientes: pH, textura, % de m.o., salinidad, carbonatos, caliza activa, y contenidos en macro y micronutrientes.

4.3.1.1 pH

Influye sobre las propiedades biológicas del suelo: las plantas, y los microorganismos del suelo presentan un determinado intervalo de pH óptimo para su crecimiento, generalmente próximo a la neutralidad.

4.3.1.2 Textura

La textura en sí tiene poco efecto sobre el crecimiento de los cultivos en tanto que la humedad, los nutrientes y la aireación sean los correctos. Aún así, es importante considerar el tipo de macro-fracción de tierra fina (arcilla, limo y arena), ya que se encuentra íntimamente relacionada con las propiedades físico-químicas del suelo, afectando a su productividad y a la facilidad de labranza o preparación. Los diferentes tipos de textura se agrupan en tres categorías que van a definir el tipo de terreno: ligeros, medios y fuertes. Así, los terrenos medios, que presentan propiedades intermedias entre los ligeros y los fuertes, son los más adecuados para el desarrollo de los cultivos.

4.3.1.3 Materia orgánica

La materia orgánica actúa de manera positiva en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ejerciendo una influencia favorable sobre la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos. El contenido medio de materia orgánica en la parte superior de los suelos cultivados de la zona mediterránea suele variar entre el 1 y el 3%, y disminuye progresivamente con la profundidad. El nivel deseable de materia orgánica en suelos arcillosos medios es del 2%, pudiendo descender a 1,65% en suelos pesados y llegar a un 2,5% en los suelos arenosos.

4.3.1.4 Carbonatos totales y Caliza activa

La presencia de carbonatos en un suelo tiene una acción positiva sobre su estructura (ya que el calcio es un catión floculante) y sobre la actividad microbiana, aunque en

exceso puede crear problemas de nutrición por antagonismo con otros elementos. Para obtener una idea exacta de la importancia que poseen los carbonatos en los procesos químicos del suelo, y siempre que su valor sea superior a un 8-10%, se deberá completar esta información con la referida a caliza activa. Se consideran suelos calizos cuando el contenido en carbonatos totales es superior al 20%.

Si el contenido de un suelo en caliza activa es muy alto o muy bajo (<3% ó >9% g/100 g), los cultivos pueden sufrir alteraciones, produciéndose inmovilizaciones de elementos nutritivos o interfiriendo en la asimilación de hierro (clorosis férrica) en el primer caso, o causando un mal desarrollo de las plantas si las concentraciones son bajas.

4.3.1.5 Conductividad eléctrica

Cuando los niveles de salinidad, según la conductividad eléctrica, se sitúan por debajo de 2 mS/cm, se consideran suelos no salinos cuya influencia sobre los cultivos es inapreciable.

4.3.1.6 Elementos nutritivos

Se clasifican generalmente atendiendo a la cantidad utilizada por la planta y a la frecuencia con que es necesaria su aportación al cultivo. Así, distinguimos entre los macro-nutrientes como los elementos absorbidos por las plantas en grandes cantidades (N, P, K, S, Ca y Mg), y micro-elementos los absorbidos en cantidades mínimas (Fe, Co, Zn, Mn, Mo, B y Cl). Cada especie tendrá requerimientos concretos que es muy importante tener en cuenta para asegurar el éxito de la plantación.

4.3.2 Disponibilidad hídrica durante el periodo vegetativo

La producción final de un cultivo energético estará condicionada en gran medida por la disponibilidad hídrica durante el periodo vegetativo. En general, en España contamos con un clima mediterráneo con mayor o menor grado de continentalidad, es decir, con una marcada sequía estival en la que existen varios meses sin precipitaciones durante el periodo vegetativo de los cultivos, y con altas temperaturas veraniegas. Estos hechos hacen imprescindible el riego en la mayor parte de las plantaciones o el estar seguros de una disponibilidad de agua freática durante esa sequía estacional.

4.3.3 Climatología

Además de las precipitaciones, los principales componentes climáticos que van a influir sobre el desarrollo de los cultivos energéticos, serán la luz y la temperatura. Como la intensidad y la duración de la irradiación no son un problema en la mayor parte de la geografía española, el factor que habrá que tener en cuenta es la temperatura. El crecimiento está directamente relacionado con la temperatura, por lo que cada especie necesitará de unas temperaturas mínimas para brotar o germinar, de unos intervalos de temperaturas óptimos para un desarrollo y de unas temperaturas

umbral, por debajo y por encima de las cuales, aunque la planta sobreviva, no proporcionará sus mejores rendimientos.

Un factor muy importante y limitante para muchas especies son las heladas o las temperaturas inferiores a 0º, especialmente aquellas que se dan de forma temprana o tardía, ya que producirán el congelamiento de las partes más desprotegidas, como las hojas jóvenes y las yemas laterales. Los daños dependerán de la duración del período frío.

4.4 CULTIVOS ENERGETICOS HERBÁCEOS

A nivel global se han desarrollado cultivos para producir con ellos, como materia prima, distintos tipos de energía, desde la producción de calor hasta electricidad, biogás y los llamados biocarburantes, como el bioetanol y biodiesel. Así, los cultivos lignocelulósicos se utilizan para producir calor y electricidad; los ricos en azúcar o almidón para producir bioetanol; y los cultivos oleaginosos para producir biodiesel (Tabla I-13).

Tabla I-13. Cultivos herbáceos clasificados según su composición (Fuente: Elaboración propia)

LIGNOCELULÓSICOS	**RICOS EN AZÚCAR Y ALMIDÓN**	**OLEAGINOSOS**
Cereales	Remolacha (*Beta vulgaris*)	Colza (*Brassica napus*)
Colza etíope (*Brassica carinata*)	Pataca (*Heliantus tuberosus*)	Girasol (*Helianthus annuus*)
Cardo (*Cynara cardunculus*)	Sorgo var. dulce (*Sorghum bicolor*)	Soja (*Glycine max*)
Sorgo papelero (*Sorghum bicolor*)	Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)	Jatrofa (*Jatropha curcas*)
Miscanto (*Miscanthus x giganteus*)	Cebada (*Hordeum vulgare*)	Tártago (*Ricinus communis*)
Panizo o switchgrass (*Panicum virgatum*)	Trigo (*Triticum* spp.)	Lino *(Linum usitatissimun)*
Caña común (*Arundo donax*)	Maiz (*Zea mays*)	
	Mandioca (*Manihot esculenta*)	

Las especies herbáceas lignocelulósicas pueden ser perennes (ej. miscanto, caña, panizo o cardo), o anuales (ej. colza y sorgo). La ventaja de las especies perennes es que pueden rebrotar varios años (hasta 7 veces en el caso del cardo) sin necesidad de resembrar tras las cortas, lo que reduce considerablemente su coste de implantación con respecto a otras especies. Un ejemplo de las potenciales productividades y de las características energéticas de las principales especies herbáceas lignocelulósicas cultivadas en España pueden apreciarse en la tabla I-14.

Para la producción de bioetanol, cabe destacar como cultivos tradicionales los cereales (cebada y trigo), la remolacha y la caña de azúcar, y como no convencionales el sorgo

dulce y la pataca. El cultivo de los cereales con fines energéticos valora la cantidad y el contenido energético de la biomasa producida, con independencia de su calidad nutritiva. En cuanto a los cultivos para la producción de biodiesel, cabe citar la colza, el girasol, o la soja como cultivos tradiciones anuales, y la jatrofa, la palma y el ricino de origen tropical. La colza etíope y el cardo poseen también un interés potencial importante para la producción de biodiesel en los países mediterráneos, dada su buena adaptación a estas condiciones climáticas.

Tabla I-14. Características energéticas y productividades de algunas de las especies lignocelulósicas herbáceas cultivadas en la geografía española (Fuente: Elaboración propia).

ESPECIE	**PCS (MJ/kg ms)**	**PCI (MJ/ kg ms)**	**Contenido en cenizas (%/m.s.)**	**Humedad de recolección (%)**	**Productividad (t m.s./ha. año)**
Arundo donax	18	15	3-3,8	50-60	20-25/10
Brassica carinata	18,6	17,2	6-9	60-80	8-15
Cynara cardunculus	16,7	15,5	5-10	15	6-10/20 *
Miscanthus spp.	16,8	19,6	1,6-3,6	20	7-30
Panicum virgatum	17,5	18,5	2-10	20	7-14
Sorghum bicolor	-	16,6	9,7	80	15-25

PCS: Poder calorífico superior**; PCI:** Poder calorífico inferior

* No se obtienen rendimientos los dos primeros años

4.4.1 Operaciones de cultivo generales para cultivos herbáceos

4.4.1.1 Valoración y selección zonal

En primer lugar se tendrán en cuenta las demandas ecológicas de la especie o variedad a implantar, especialmente aquellas relacionadas con la precipitación y con el suelo, como ya se ha desarrollado en el apartado 3 de este tema.

4.4.1.2 Preparación del terreno

La preparación del terreno puede realizarse con maquinaria agrícola convencional, no difiriendo de las prácticas tradicionales de arado y gradeo empleadas para la mayoría de los cultivos herbáceos anuales.

4.4.1.3 Abonado

Se realizarán, en función de la especie y de los resultados obtenidos en los análisis de suelo de la parcela a cultivar, diferentes abonados de cobertera y de fondo.

4.4.1.4 Siembra o plantación

Esta actuación es uno de los momentos más críticos para un cultivo, por lo que es de gran importancia que se haya llevado a cabo una preparación del terreno adecuada y acertar con la dosis de semilla apropiada para las especies anuales, y una densidad adecuada de rizomas, bulbos o tallos para las especies perennes. Cada especie

requerirá de épocas de siembra y profundidad de siembra distintas. En general, la maquinaria utilizada es la misma que se utiliza para cereal.

4.4.1.5 Control de malas hierbas

Es fundamental el control de malas hierbas antes de la nascencia, no siendo necesario aplicar más que un herbicida cuando el cultivo es infestado por gramíneas.

4.4.1.6 Control de plagas y enfermedades

Las plagas merecen una atención especial en primavera, haciéndose a menudo necesario intervenir con insecticidas.

4.4.1.7 Riego

En función de la especie a cultivar será necesario el aporte de riegos, especialmente en los periodos de sequía estival.



Figura I-28. Cultivo de a) cardo y b) miscanto

4.4.1.8 Cosecha

En general, la recolección o siega de biomasa de las especies herbáceas se puede realizar con maquinaria convencional agrícola. Existen varias opciones de recolección, entre las que cabe destacar (i) Siega y empacado, realizado directamente, sin triturar la biomasa (realizado con rotoempacadora), o (ii) Siega con cosechadora de grano y posterior hilerado-empacado.

4.5 CULTIVOS ENERGÉTICOS LEÑOSOS

Se entiende por cultivo energético leñoso a aquellas especies leñosas, de crecimiento rápido y con un sistema de manejo intensivo, que son cultivadas a turnos cortos con el objetivo de lograr altas producciones de madera para destino energético. Este tipo de cultivos podría clasificarse en dos grandes bloques, aunque existe bibliografía en la que los SRF incluyen a los SRC y el cultivo de fustes individuales:

- **Short Rotation Coppice- SRC.-** Plantaciones basadas en el método de beneficio de monte bajo, es decir, aquellas especies que son capaces de rebrotar de raíz o de cepa produciendo múltiples brotes. Estos cultivos son objeto de recepe cada

pocos años con vistas a lograr nuevos brotes en cada primavera. Se tiene, de este modo, plantaciones con turnos de 2 a 10 años y con una duración del cultivo que oscila en torno a los 20-30 años antes de tener que ser levantado (Figura I-29a).

- **Short Rotation Forestry- SRF**.- En este caso se trata de cultivos más parecidos a las plantaciones forestales tradicionales, pero con períodos de corta inferiores que se producen cuando el árbol alcanza 10-20 cm a una altura de 1,30 m. Por tanto, el turno de corta de estos cultivos será variable en función de la especie empleada y de la calidad de estación donde esté situada (Figura I-29b).

Cuando hablamos de cultivos energéticos leñosos, en general, solamente las especies frondosas, tales como chopo (*Populus* spp.), sauce (*Salix* spp.), olmo de Siberia (*Ulmus pumila* L.), paulownia (*Paulownia* spp.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.), robinia (*Robinia psudoacacia* L.), entre otras, cumplen los requisitos necesarios para considerarse como tales. Otros géneros menos productivos y menos ensayados pero que también pueden considerarse aptos como cultivos energéticos leñosos serían: aliso (*Alnus*), plátano de paseo (*Platanus*), fresno (*Fraxinus*), abedul (*Betula*), haya (*Fagus*), liquidámbar (*Liquidambar*), castaño (*Castanea*), ailanto (*Ailanthus*), higuera (*Ficus*), etc. Estos cultivos lignocelulósicos se utilizan primordialmente como productores de biocombustibles sólidos con fines térmicos y/o eléctricos, incluso para la producción de biocarburantes de segunda generación (ej. etanol) como sustitutivos de los carburantes convencionales.



Figura I-29. Plantación de a) chopo y de b) paulownia

4.5.1 Operaciones de cultivo generales para cultivos leñosos

4.5.1.1 Valoración y selección zonal

Antes de establecer un cultivo energético hay que comprobar que se cumplen unos requisitos mínimos de aptitud climática y edáfica para el crecimiento de la especie, así como la adecuación de la parcela en relación a las prácticas de manejo derivadas de su aprovechamiento. Así, será imprescindible realizar una valoración de:

- **Requerimientos de suelo y clima**: Cada género, especie, híbrido, clon o variedad requiere unas condiciones edafoclimáticas diferentes. Se considerarán aquellos factores expuestos en el apartado 3 de este tema.

- **Ubicación de la plantación**: La elección de la parcela requiere una serie de consideraciones tales como:
    - Facilidad de acceso por parte de la maquinaria
    - Disponer de una red de carreteras próxima
    - Distancia óptima a la planta de valorización
    - Evitar la plantación bajo tendidos eléctricos en caso de especies leñosas
    - Evitar pendientes superiores al 10%
    - Dar preferencia a parcelas que tengas formas regulares, para mejorar la eficiencia y la movilidad de la maquinaria.
    - Considerar posibles restricciones ambientales y paisajísticas

4.5.1.2 Elección de la densidad, diseño y turno

Como ejemplo, en la Tabla I-15, aparecen reflejadas los valores para estos tres factores para tres especies leñosas.

Tabla I-15.- Características de plantación y turnos para tres de los cultivos leñosos de rotación corta más utilizadas (Fuente: Conama 2010; Salvia 2011)

	CHOPO	EUCALIPTO	PAULOWNIA
Densidad (plantas/ha)	Entre 1.100 y 9.000	Entre 2.500 y 3.333	1.666
Diseño	Hilera Simple (Modelo Americano): 0,5x3 m Hilera Doble (Modelo Europeo): líneas pareadas a 75 cm y calles de 150 cm. Distancia entre plantas 35-40 cm.	Marco rectangular (separación entre líneas ≥ 3 m)	Hilera simple (3x2 m)
Turno y rotación	1-5 años con 5 rotaciones de cultivo	3 años y al menos 5 rotaciones de cultivo	3 años y 7 rotaciones de cultivo

4.5.1.3 Elección y preparación del material vegetal

Se contará con materiales que presenten características adecuadas en cuanto a rápido crecimiento, producción elevada y continua de brotes, resistencia a enfermedades y plagas, amplia utilización de periodo vegetativo, etc.

4.5.1.4 Preparación del terreno

Las actuaciones a realizar dependerán de la especie y de las características del lugar de la plantación. En todos los casos, los tratamientos se centrarán en la eliminación de la vegetación pre-existente y en el posterior control de malas hierbas y malezas.

4.5.1.5 Plantación

Para las especies leñosas, la plantación suele realizarse al finalizar el invierno o al comienzo de la primavera, intentando evitar daños por heladas. Podría realizarse manualmente aunque ya existen máquinas plantadoras de diferentes tipologías que facilitan esta labor.

4.5.1.6 Tratamientos culturales de mantenimiento

- **Reposición de marras**: Si el porcentaje de marras supera el 15% habrá que plantearse levantar la plantación y volver a instalarla. Entre el 5 y el 15% se valorará la reposición de marras.
- **Eliminación de vegetación competidora**: Es necesario un control eficaz de malas hierbas mediante labores mecánicas con cultivador o la aplicación de tratamientos herbicidas no residuales, no selectivos y translocables.
- **Fertilización**: Como ya se ha comentado, la aplicación de fertilizantes debe determinarse en función de los resultados de los análisis de suelo y será específica para cada especie.
- **Gestión del riego**: La optimización de la gestión en el uso del agua en plantaciones de cultivos energéticos permite alcanzar resultados muy buenos con empleo de cuotas de riego muy bajas.
- **Control de daños bióticos y abióticos**: Las medidas preventivas para evitar problemas fitopatológicos pasan por la elección de material vegetal tolerante, favorecido por la introducción de al menos 5 variedades distintas para diversificar el cultivo.

4.5.1.7 Cosecha

Una vez alcanzado el turno se realiza la cosecha. Se realizará durante la parada vegetativa, evitando épocas de alta humedad en el suelo. El corte de la cepa deberá realizarse de tal manera que se asegure la viabilidad futura de la cepa (entre 5 y 10 cm sobre el suelo). Existen máquinas para cosecha con astillado directo y máquinas para cosechar la planta entera ya sean de varas (cortadoras y cortadoras-compactadoras) o de tronco mediante procesadoras forestales convencionales.



Figura I-30. Mecanización del cultivo y manejo de especies leñosas con fines energéticos. a) Plantadora de estaquillas, b) plantadora de varas de sauce y c) recolección con astillado directo (Fuente: Ciria 2011)

4.5.1.8 Manejo de la plantación tras la corta

Tras el nuevo rebrote de las cepas comienza el nuevo ciclo o turno. Habrá que realizar de nuevo un control de malas hierbas, favorecidas por la puesta en luz del cultivo, y todos los tratamientos culturales necesarios. Agotados los ciclos de producción, se procederá al levantamiento de las cepas ayudándonos de aperos destoconadores de vivero o utilizando una retroexcavadora.

4.5.2 Características de la biomasa leñosa para aplicaciones energéticas

Cuando se trata de producir calor y/o electricidad, la biomasa procedente de especies leñosas posee características químico-energéticas más adecuadas que la biomasa procedente de especies herbáceas. Los valores medios que poseen las especies leñosas de rotaciones cortas, expresados en porcentaje sobre biomasa seca son: PCS=19-20 MJ/kg y PCI=17,5-18,5 MJ/kg de biomasa seca (0% de humedad), un contenido en cenizas entre un 2-3 % y valores de nitrógeno < 1%, y de azufre y cloro < 0,1 %.

Tabla I-16. Características energéticas de algunas de las especies lignocelulósicas leñosas cultivadas en la geografía española (Fuente: Elaboración propia).

ESPECIE	PCS (MJ/kg ms)	PCI (MJ/kg ms)	Contenido en cenizas (%/ms)	Humedad de recolección (%)	Productividad (t ms/ha. año)
Populus spp	19,4	18,2	1-2	45	10-14 (36-60)
Salix spp.	-	-	2-4	55	13
Robinia pseudoacacia	19,5	-	-	33	5-8
Paulownia spp.	19,7	18,4	1,8-4,5	40-55	35-45
Ulmus pumila	17,5	18,9	0,8	47	5-10
Eucalyptus spp.	19,5	17,1	-	30	5-20

4.6 CULTIVOS ACUÁTICOS

El 70% de la superficie terrestre se encuentra cubierta por los mares y océanos. Hasta el momento, las explotaciones biomásicas marinas han sido mínimas, pero el incremento de la población y de la demanda creciente de alimentos y productos energéticos ha motivado un auge en la investigación sobre las posibles formas de producción de biomasa en este ecosistema.

El cultivo de plantas marinas más conocido es el de las algas (macro y micro-algas), y presenta una serie de ventajas en relación a los cultivos terrestres:

- Tasas de crecimiento mucho mayores
- Capacidad de crecer sobre una gran variedad de sustratos y condiciones

- Producción de aceite por área entre 7 a 30 veces mayor (4,6 y 18,4 l/m^2), incluso 200 veces mayor en función de la especie ensayada
- No requiere grandes superficies para su producción (en unos 52.000 km^2 se podrían obtener 95 millones de barriles de biodiesel)

Sin embargo, y salvo en países de Asia oriental y sudoriental, que utilizan las algas como recurso gastronómico, el cultivo de éstas es aún incipiente, existiendo numerosos centros de investigación que dedican su labor al desarrollo de proyectos de I+D+i vinculadas a la selección, cultivo o cosechado de microalgas y macroalgas.

Las algas están compuestas básicamente por proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y ácidos grasos. Los ácidos grasos se encuentran en las membranas, en los productos de almacenamiento, metabolitos, etc. El porcentaje de ácidos grasos varía según la especie, aunque hay especies cuyos ácidos grasos representan 40% de su peso seco. Estos son los ácidos grasos que luego son convertidos en biodiésel. Para la producción de estos se buscan algas que contengan un alto contenido en lípido y que sean fácilmente cultivables. La productividad de estos vegetales oscila alrededor de 100 t/ha.año de materia seca, pudiendo algunos géneros alcanzar hasta las 125 t.

4.6.1 Especies de algas más utilizadas

Aunque existen numerosas especies de macro y microalgas que actualmente se están ensayando para extraer de ellas aceites (ej. géneros *Scenedesmus*, *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Spirogyra*, *Cunaliella*, *Euglena*, *Tetraselmis*, etc…), una de las más utilizadas en el desarrollo de biodiesel es la especie *Botryocuccus braunii* (Figura I-31), que produce una alta cantidad de hidrocarburos (terpenos) que constituyen alrededor del 30-40% de su peso seco.



Figura I-31. Botryococcus braunii (Fuente: http://www.utarmicroalgae.com)

4.6.2 Cultivo de algas para la producción de aceites

Al igual que las plantas, las algas necesitan de tres componentes básicos para su crecimiento: luz solar, CO_2 y agua, por tanto, no es difícil hacer crecer cepas de algas pero sí es complicado encontrar cepas que posean las características apropiadas para la elaboración de biodiesel, y que no se contaminen con otras especies durante el proceso de cultivo.

En general, el cultivo de algas se realiza de dos formas:

4.6.2.1 Sistemas abiertos

Se trata de estanques y lagos. El riesgo de este tipo de sistemas de cultivo se basa en la elevada probabilidad de que las cepas de interés se contaminen con otros tipos de cepas o de especies. De hecho, las especies que tienen mayores cantidades de aceites no son en general las que crecen más rápido, por lo que suelen darse contaminaciones masivas de cultivos por cepas contaminantes.

Además, en este tipo de cultivos no se tiene control frente a condiciones ambientales (ej. temperatura del agua, CO_2, intensidad lumínica, etc.), por lo que el crecimiento del cultivo depende de las condiciones del medio, y en general, se produce durante los meses más cálidos. Como ventaja, es que este tipo de cultivo es muy barato y fácil de construir.

4.6.2.2 Sistemas cerrados

Un sistema alternativo a los sistemas abiertos es a través de invernaderos, también en estanque. En este caso se tiene un mayor control sobre la temperatura y la cantidad de CO_2 y existe menos probabilidad de contaminación con especies no deseadas.

Otro tipo de sistemas cerrados son los fotobiorreactores (Figura I-32), que incorporan luz blanca y natural y donde las condiciones son totalmente controladas. Son sistemas muy costosos pero en ellos se dan altos rendimientos en cuanto a la producción de algas.

Actualmente no se ha producido biodiesel a partir de algas a gran escala, pero se espera que en los próximos años el cultivo y la producción de biodiesel en forma masiva sea una realidad. De esta manera, se podrá explotar un recurso que no es contaminante, que reduce los efectos del CO_2 en la atmósfera, así como las emisiones de compuestos nitrogenados, que rinde mucho más que los combustibles fósiles y que los biocombustibles producidos hasta ahora, y que no compite por tierras cultivables para alimentos para la creciente población mundial.



Figura I-32. Producción de biocombustibles a partir de algas (Fuentes: http://www.renovables-energia.com y http://www.ingenieriaquimica.net)

4.7 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Báscones E. 2004. Análisis de suelo y consejos de abonado. Excma. Diputación Provincial de Valladolid-INEA. Valladolid. 65 p.

Ciria P, Carrasco JE, Sixto H, Hernández MJ, Cañellas I. 2011. Mecanización del cultivo y manejo de la cosecha del chopo con fines energéticos. *Vida Rural,* nº 322. En Mecanización.

Ciria P. 2011. Desarrollo de los cultivos energéticos leñosos en España. *Vida rural*, nº 329. En Reportaje.

CONAMA 2010. Situación actual de la biomasa y tendencias de futuro. Documento del Grupo de Trabajo nº 24 de Conama 10. Congreso Nacional de Medio Ambiente 2010. Noviembre, 2010. Madrid. 89 p.

Etchetto GA. 2009. Biodiésel de Algas. Proceso de producción de biodiesel utilizando algas. BiodiSol. http://www.biodisol.com

Gros A, Domínguez A. 1992. Abonos, guía práctica de la fertilización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 450p.

IDAE 2007. Biomasa: Cultivos energéticos. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. BESEL, S.A. (Departamento de Energía). Madrid. 7 p.

PByCL 2011. Plan Regional de ámbito sectorial de la bioenergía de Castilla y León, aprobado el 20 de Enero de 2011 (BOCyL nº 17 de 26 de Enero de 2011)

Salvia J. 2011. Cultivos leñosos de corta rotación. BIOPOPLAR Ibérica s.l. Ponencia extraída de la página web de REMAR (Red Energía y Medio Ambiente: http://www.redremar.com/Ponencias_GT7.html).

Vega DJ, Dopazo R, Ortiz L. 2010. Manual de cultivos energéticos. Universidad de Vigo-Cátedra de ENCE. 214 p.

5 OTRAS FUENTES DE BIOMASA

5.1 RESIDUOS GANADEROS

Las explotaciones ganaderas intensivas (avícolas, porcinas, ovinas y vacunas) producen grandes cantidades de residuos procedentes de los derivados del tratamiento de las deyecciones de animales, denominados estiércoles y purines. Estos residuos, forman parte de los residuos orgánicos y, como tales, contienen en su composición una fracción orgánica (fuente de energía) y una fracción mineral (fuente de elementos inorgánicos), entre los que se encuentran representados todos los macro y micronutrientes necesarios para la vida de las plantas. Además, también contienen sustancias orgánicas tóxicas, elementos minerales potencialmente tóxicos y microorganismos patógenos.

La producción de heces que produce cada animal varía dependiendo de la especie, la raza, la alimentación, la estación climática, etc, con valores medios que van desde 0,1-0,5 kg. heces/día para las aves, hasta 30-50 kg. heces/día para el ganado vacuno. Asimismo, la composición de las heces es variable dependiendo sobre todo de la especie.

Los **estiércoles** son los productos de la fermentación de un material orgánico, usado como cama o yacina con los excrementos de un animal, por lo que su composición dependerá de la naturaleza de la yacina y de la especie de la que procedan las deyecciones, así como del tiempo y tipo de fermentado (Figura I-33a).



Figura I-33. a) Estiércol producido en una explotación ganadera intensiva; b) Balsa de purines en la planta de reciclaje ubicada en Vall d'Alba, en la provincia de Castellón

Por otro lado, los **purines** son los productos de la fermentación, en las fosas de almacenamiento (Figura I-33b), de las deyecciones del ganado con el agua de lavado de las naves donde se cría si las fosas son cerradas, o con ésta y el agua de lluvia si las fosas son abiertas. Las principales causas de variabilidad son la dilución de las heces y orina, y la duración y el tipo de fermentación, anaerobia en este caso.

Siempre que sea posible, el sistema más lógico y económico para la eliminación de estos residuos ganaderos será su utilización como fertilizante mediante la aplicación al

suelo, pero en el caso de que exista un exceso de residuos será necesario su tratamiento.

La eliminación de estos residuos, debido a su alta carga orgánica, genera serios problemas ambientales y el tratamiento más adecuado para reducir la carga contaminante es la digestión anaerobia (proceso bioquímico de digestión de la materia orgánica por microorganismos en ausencia de oxígeno). El biogás producido en este proceso contiene un alto rendimiento en metano, con una PCI del orden de 23 MJ/m^3, que se designa normalmente como biogás, y que presenta un gran aprovechamiento energético.

Este combustible tiene varias aplicaciones: puede ser utilizado en motores de combustión interna para accionar turbinas en la producción de eléctricidad (lo que permite también autoabastecer la planta); o para producir calor y paliar necesidades comerciales y domésticas, e incluso como un combustible en vehículos especialmente modificados.

5.2 RESIDUOS Y SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES

Existen una amplia gama de residuos, originados generalmente por una actividad industrial, que tras su paso por alguna instalación de tratamiento adecuada, sirven de materia prima para elaborar un combustible adecuado para su utilización, por ejemplo, en hornos de cemento, centrales térmicas, etc… De esta manera, se está aprovechando la energía contenida en un recurso ilimitado, como son los residuos que no se han podido reutilizar y/o reciclar, para dejar de utilizar combustibles derivados del petróleo, recurso finito que tiende a agotarse.

A este proceso se le denomina de distintas formas tanto desde un punto de vista técnico como legal: “valorización energética”, “co-incineración” o “recuperación energética”. Algunos ejemplos de estos residuos, de variada y compleja naturaleza, que se utilizan como combustibles alternativas pueden clasificarse en:

COMBUSTIBLES SÓLIDOS

- Vehículos fuera de uso (VFU)
- Neumáticos fuera de uso (NFU)
- Plásticos usados
- Lodos de estación de depuración de aguas residuales (se verá en siguiente apartado)
- Residuos de industrias cárnicas

COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

- Aceites minerales usados
- Disolventes, pinturas, barnices y otros residuos líquidos
- Residuos de hidrocarburos

Como ejemplo, señalar que el sector cementero español utilizó durante el año 2010 unas 608.000 toneladas de combustibles derivados de residuos. Estos combustibles permitieron ahorrar la emisión de 488.666 toneladas de CO_2 a la atmósfera, lo que equivale al consumo energético de 430.000 hogares (www.fundacioncema.org). La Figura I-34 refleja diagrama de flujo de la fabricación de cemento y el punto del proceso donde se realiza la valorización energética de muchos residuos provenientes de muy diversos sectores de la industria.

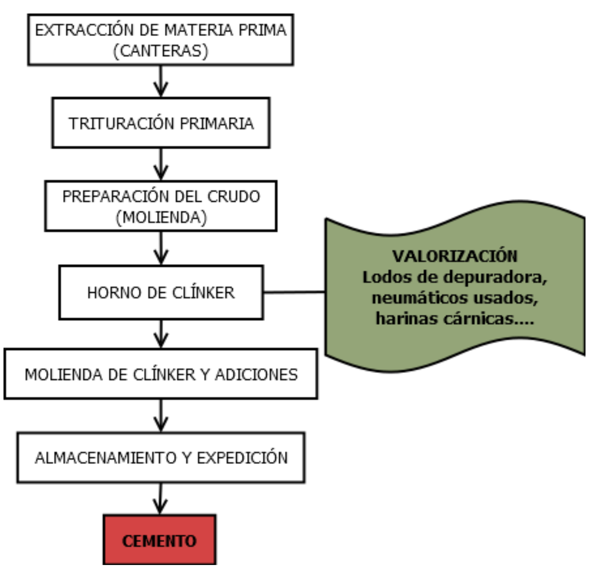


Figura I-34. Proceso de Fabricación de Cemento: Herramienta para la gestión de residuos (Fuente: Memoria de Actividades 2011 CEMA).

5.2.1 Combustibles sólidos

5.2.1.1 Vehículos al final de su vida útil (VFU)

La composición de un vehículo al final de su vida útil es la siguiente:

- Metales férricos: 68%
- Metales no férricos: 7%
- Fluidos: 1,2%
- Neumáticos 4%
- Vidrio: 3%
- Plásticos-gomas: 1%
- Parte no metálica. Componentes reutilizados: 1,3%

A grandes rasgos, se puede hablar de una fracción ligera (con PCI de 20,1 MJl/kg), que contiene plásticos, fibras, textiles, gomas, etc., y una fracción pesada (PCI=27,6 MJ/kg), compuesta fundamentalmente por plásticos y gomas. Las vías de gestión actuales de este tipo de residuos se descomponen en un 4,6% de reutilizables, un 78,5% de

reciclado, un 75% de metales férricos y no férricos y un 2,5% de valorización energética (PER 2011-2020).

En términos energéticos, y asumiendo un PCI medio de 20,1 MJ/kg, tenemos el siguiente potencial de los VFU a lo largo de la década en curso (Tabla I-17):

Tabla I-17. Potencial disponible de los VFU (Fuente: PER 2011-2020)

AÑO	KTEP	KTEP RENOVABLES	GWhe	GWhe RENOVABLES
2010	205	37	596	107
2015	234	42	682	123
2020	266	48	773	139

5.2.1.2 Neumáticos fuera de uso (NFU)

Según datos aportados por el PNIR (Plan nacional integrado de residuos), los objetivos de valorización energética de este residuo para el año 2012 son un 25% del total de los NFU y un 20% para el año 2015. Por tanto, y aceptando como válida esta hipótesis y asumiendo un PCI=29,3 MJ/kg, el potencial disponible procedente de este flujo de residuos sería:

Tabla I-18. Potencial disponible de los NFU (Fuente: PER 2011-2020)

AÑO	KTEP	KTEP RENOVABLES	GWhe	GWhe RENOVABLES
2010	45	11	131	33
2015	49	13	144	37
2020	41	10	119	30



Figura I-35. Vehículos al final de su vida útil (VFU) y neumáticos fuera de uso (NFU)

5.2.1.3 Plásticos usados y restos de envases

Los plásticos usados pueden ser aprovechados como combustible por su elevado poder calorífico, similar al del fuel-oil o al del gas natural (Tabla I-19). Diversos estudios han demostrado que para muchos plásticos la valorización energética es más beneficiosa medioambientalmente que el reciclado mecánico o la recuperación de los componentes básicos, sobre todo cuando se trata de plásticos que proceden de la agricultura (ej. cubiertas de invernaderos) o en determinados casos de RSU.

Tabla I-19. Poder calorífico de diferentes tipos de plásticos comparados con otros combustibles

PODER CALORÍFICO (MJ/kg)	
Poliestireno	46
Polietireno	46
Polipropileno	44
PVC	18
Gas natural	48
Fuel-oil	44
Hulla	29
Papel	16,8
Madera	16
Grasa	7,8
Basura doméstica	8

En España se han realizado experiencias de valorización energética entre las que se encuentra la co-combustión en central térmica de carbón pulverizado con combustibles derivados de plásticos sustituyendo el carbón por los films de polietileno de los invernaderos. Los resultados de esta experiencia se han considerado un éxito desde el punto de vista económico, ya que, por ejemplo, el polietileno tiene la misma eficacia que el carbón, por lo que gracias a su uso se reduciría el consumo del carbón, mayoritariamente importado. Desde una perspectiva medioambiental se comprobó que no existió un cambio en las emisiones al utilizar el polietileno, debido a su naturaleza libre de impurezas.



Figura I-36. Envases de plástico y residuos procedentes de la industria de la madera

Por otro lado, la utilización de Combustibles Derivados de Plásticos (CDP) en instalaciones diferentes a las centrales térmicas, como son las cementeras, es ya una realidad. Su uso es recomendable ya que no sólo con su combustión no tiene lugar un aumento de las emisiones a la atmósfera, sino que pueden incluso reducir estos niveles de emisiones, particularmente de óxidos de azufre y de carbono.

5.2.1.4 Residuos provenientes de industrias cárnicas

La utilización de harinas cárnicas como alimento para el Ganado está prohibida en toda la UE desde el año 2003 debido a la aparición de la enfermedad de las vacas locas (Encefalopatía Espongiforme Bovina). Por tanto, y gracias al elevado poder calorífico

que presentan las harinas (PCI=18,8 MJ/kg), en la última década han proliferado los estudios enfocados a la valorización energética de esta materia prima, principalmente mediante la pirolisis y gasificación para la generación de energía eléctrica.

5.2.2 Combustibles líquidos

5.2.2.1 Aceites usados (minerales y de alimentación)

El aceite lubricante que consumen la maquinaria industrial y los millones de vehículos que circulan por nuestras carreteras (Figura I-37a) se convierte, tras su uso, en un residuo tóxico y peligroso. Se trata de una sustancia de viscosidad variada, ennegrecida con respecto al original y cuya eliminación por vertido o incineración incontrolada origina graves problemas de contaminación en el aire, agua y suelo debido a su toxicidad, la emisión de gases y su degradación química. La peligrosidad del aceite usado deriva del desprendimiento durante su combustión de muy diversos compuestos nocivos: cloro, níquel, disolventes halogenados, plomo, cadmio, tolueno, benceno, etc. Además, su escasa biodegradabilidad provoca que los efectos del aceite usado sobre el entorno puedan permanecer durante décadas.

Según datos proporcionados por SIGAUS (Sistema integrado de gestión de aceites usados http://www.sigaus.es), en España se generan cada año unas 200.000 t de residuos procedentes del aceite usado industrial, de los que más del 70% son regenerados o reutilizados. Cuando el aceite no puede ser regenerado o reciclado se somete a procesos mediante los que se posibilita su posterior utilización como combustible alternativo (PCI=42 MJ/kg), ahorrando otros combustibles tradicionales, ya sea en centrales térmicas de generación eléctrica, en cementeras, equipos marinos o en otros procesos industriales.

En cuanto a los aceites de alimentación usados (Figura I-37b) se calcula que cada persona genera anualmente cerca de 4 litros de restos de aceite vegetal. Este residuo vertido por los desagües domiciliarios, no solo daña la red de abastecimiento, sino que contamina las aguas de los cauces públicos (se estima que 1 solo litro de aceite puede contaminar hasta 1.000 litros de agua).



Figura I-37. a) Aceite usado de motor abandonado en una ciudad y b) aceite doméstico usado

Este residuo, recogido apropiadamente, puede aprovecharse para la fabricación de jabones y producto de cosmética, así como para su utilización como abono orgánico o lubricante para la elaboración de velas, pinturas o barnices. Así mismo puede ser convertido, mediante un proceso de transesterificación en biodiesel.

5.3 RESIDUOS URBANOS

Los residuos urbanos se generan diariamente en grandes cantidades en los núcleos de población, y éstos pueden incluirse dentro de dos grandes grupos (Figura I-38):

- **Residuos sólidos urbanos (RSU)**: materiales generados en los procesos de consumo humano que son destinados al abandono; constituyen la biomasa residual más aprovechable ya que está concentrada.
- **Aguas residuales urbanas (ARU)**: líquidos procedentes de la actividad humana, cuya fracción sólida contiene una apreciable cantidad de biomasa residual; su depuración genera unos fangos que poseen una alta carga contaminante, que es necesario reducir.



Figura I-38. Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU)

Hoy en día existen diferentes tecnologías que se pueden aplicar para la valorización energética de este tipo de residuos (ver también capítulo 4 del bloque II de este curso). La mayoría de ellos consisten en procesos de tratamiento térmico como son la incineración, la gasificación, la pirolisis o la gasificación por plasma. Cada una de ellas se encuentra en un estado de desarrollo de distinto nivel. También se cuenta con la biometanización o digestión anaerobia de la fracción orgánica con valorización del biogás obtenido, como una posibilidad adicional de aprovechamiento energético de los residuos. En cualquier caso, las características principales de los RSU que nos permitirán tomar decisiones sobre el sistema de tratamiento a emplear son los siguientes:

- **Densidad:** esta característica disminuye con el tiempo como consecuencia de los hábitos de consumo
- **Humedad:** el grado de humedad depende de los propios residuos, así como del clima y de la estación anual.

- **Poder calorífico:** En España, su valor oscila entre 3,4 MJ/kg y 6,7 MJ/kg.
- **Relación C:N:** que indica la capacidad del residuo para ser utilizado para compostaje. El valor óptimo está comprendido entre 25 y 30.

5.3.1 Residuos sólidos urbanos (RSU)

En España, cada ciudadano genera de media al día 1,5 kg de basura (RSU) cuyo destino mayoritario es su vertido. Esta vía de gestión es la menos recomendable tanto a nivel ambiental como por la presión sobre el territorio que existe en algunas zonas del país. Las otras vías de gestión posibles, como el reciclaje o la valorización material o energética, si bien se ha incrementado en los últimos años, representan aún unos niveles muy por debajo de la media de la Unión Europea (Estudio Técnico PER 2011-2020).

Los RSU, están formados por una gran variedad de sustancias, lo que exige que antes de ser utilizados con fines energéticos sea necesario recurrir a un minucioso proceso de separación apartando sustancias como el vidrio, el plástico o los metales, que no sirven como fuente de energía. De acuerdo con la definición de biomasa, sólo la **parte orgánica de los residuos sólidos urbanos** puede ser considerada como tal (del orden del 50%, dependiendo del tamaño y del nivel de vida de la población).

El metano es un componente principal de los gases emitidos por los vertederos y un potente gas de efecto invernadero cuando es liberado a la atmósfera. La reducción de emisiones que se obtiene capturando el gas de vertederos y usándolo como fuente de energía puede generar importantes beneficios económicos y ambientales. El gas que se despide de los vertederos es un producto natural derivado de la descomposición de materias orgánicas como alimentos y papel. Este gas emitido por los vertederos se descompone aproximadamente en un 50% de metano (CH_4), el componente principal del gas natural, en un 50% de dióxido de carbono (CO_2) y en residuos de compuestos orgánicos no metánicos. La formación de gas depende, entre otros factores del contenido en materia orgánica, de la edad, de la humedad y del pH de los residuos. El poder calorífico del gas generado tiene un valor medio de 17,6 MJ/m^3.

Por otro lado, todos los vertederos donde se depositan residuos con un alto contenido en materia orgánica tienen una producción de aguas residuales que se denominan **lixiviados**. Estos lixiviados que provienen de vertederos poseen normalmente una contaminación orgánica muy alta, y su origen es doble:

- **Aguas de percolación.** El agua, que procede generalmente de la lluvia, percola por el vertedero dando lugar a la salida de aguas cargadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- **Aguas de generación.** Los procesos de fermentación que tienen lugar en el interior de los residuos generan aguas que percolan de forma similar al caso anterior.

El proceso general de recogida de lixiviados se corresponde con una primera separación de los más concentrados de los menos concentrados mediante sistemas de tuberías de recogida dispuestas alrededor del vertedero. Posteriormente los lixiviados se recogen en un depósito de regulación y serán llevados a una planta de tratamiento.

5.3.2 Aguas residuales urbanas (ARU)

Este tipo de residuo está formado por los afluentes líquidos que genera el ser humano en su actividad diaria, procedentes de muy diversos ámbitos como: núcleos urbanos, procesos industriales, actividades mineras, agrícolas y ganaderas. También pueden incluirse las aguas pluviales cuando son afectadas por dicha actividad. Se trata de residuos con un elevado contenido en agua, y su evacuación se realiza en ríos y en el mar.

En términos generales, la mayor parte de los componentes presentes en un ARU son materia orgánica, nutrientes, metales, materia inorgánica y microorganismos:

- **Constituyentes orgánicos:** La composición del residuo orgánico de un agua residual depende de su naturaleza y origen, no obstante se puede afirmar que el material orgánico típico de un agua residual está compuesto por proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%), grasas y aceites (10%). Otro compuesto orgánico con importante presencia en las ARU es la urea, aunque debido a su velocidad de descomposición, solo está presente en aguas residuales recientes.
- **Constituyentes inorgánicos:** Dentro de los componentes inorgánicos que tienen más importancia para el control de la calidad de las ARU podemos mencionar los siguientes: pH, cloruros, azufre, compuestos tóxicos (pesticidas, insecticidas y metales), alcalinidad, gases…
- **Contenido sólido de las ARU:** Los componentes orgánicos e inorgánicos están presentes en el agua residual en forma soluble e insoluble. En general, los sólidos solubles en el agua residual comprenden gran parte del material inorgánico, mientras que el material suspendido es mayoritariamente orgánico. Los sólidos suspendidos llegan a representar más del 60% de la demanda bioquímica de oxígeno de un agua residual.
- **Nutrientes:** Se refiere a nitrógeno y fósforo en la mayoría de los casos.
- **Microorganismos:** Son principalmente virus, bacterias, hongos, protozoarios y nematodos.

Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es una instalación destinada a la reducción de la contaminación que contienen las aguas residuales antes de ser vertidas al medio receptor. Estas EDAR se clasifican en función de la procedencia de las aguas en:

- **EDAR de aguas urbanas:** donde las aguas llevan un gran contenido de materia orgánica biodegradable y proceden de los núcleos urbanos.

- **EDAR de aguas industriales:** donde las aguas de entrada son de naturaleza muy diversa ya que dependerán de la actividad industrial de la que proceden.

En la Figura I-39. se muestra el diagrama de flujo de una estación depuradora de agua residual a nivel global, destacando la línea de aguas y la línea de fangos.

La digestión anaerobia que se produce en la línea de fangos y que va acompañada por una liberación de gas metano (ver capítulo 4 del bloque II), es la que puede aprovecharse como fuente de energía si estamos ante grandes plantas de tratamiento. El gas metano se acumula en depósitos denominados gasómetros.

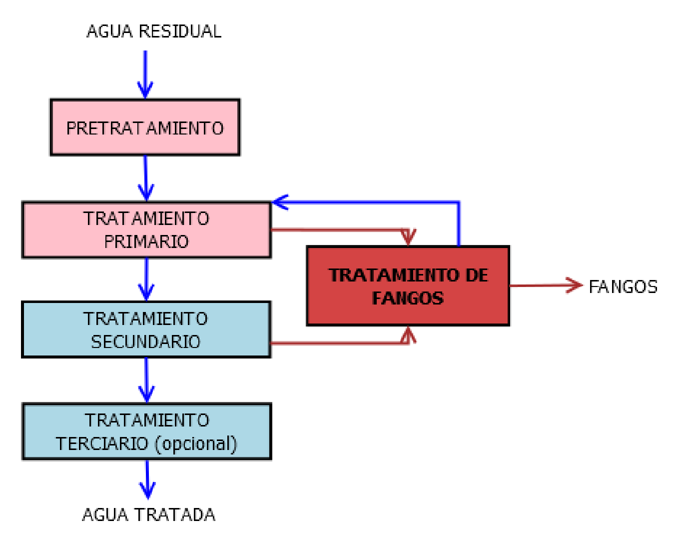


Figura I-39. Diagrama de flujo general de una EDAR. Las líneas azules: línea de agua y las granates: línea de fangos (Fuente: http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2738)

5.4 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Alcarria 2005. Evaluación tecnológica de la aplicación de reactores biológicos de membranas en procesos de tratamiento de aguas residuales. Tesis de máster. Departament dÉnginyeria Química. Universitat Politècnica de Catalunya.

Bláquez 2003. Los residuos agrícolas y de origen animal. En: *Los residuos urbanos y asimilables*. Ed. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Castells XE. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ed. Díaz de Santos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Madrid, 1254 pp. ISBN: 84-7978-694-9.

CEMA 2011. Memoria de actividades 2011. Fundación Laboral del Cemento y el Medio Ambiente.

Estudio Técnico PER 2011-2020. 2011. Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. IDAE. Madrid, 136 pp.

PNIR 2007_2015. Plan nacional integrado de residuos.

BLOQUE II. BIOCOMBUSTIBLES



BLOQUE II. BIOCOMBUSTIBLES

1 CONCEPTOS, CLASIFICACION E HISTORIA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

1.1 DEFINICION, CLASIFICACIÓN E HISTORIA DE LOS BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son aquellos combustibles obtenidos directa o indirectamente a partir de la biomasa y que, por tanto, son considerados una energía renovable. Pueden clasificarse de diferentes formas atendiendo a diversas características:

1.1.1 Clasificación según su estado

Los biocombustibles se presentan tanto en forma sólida, líquida o gaseosa. Esta clasificación será la utilizada para desarrollar los capítulos que componen el bloque de Biocombustibles de este documento.

1.1.1.1 Biocombustibles sólidos

Se considera biocombustible sólido aquel combustible sólido, no fósil, compuesto por materia orgánica de origen vegetal, animal, o producido a partir de la misma mediante procesos físicos, susceptible de ser utilizado en aplicaciones energéticas. Su origen engloba distintos sectores productivos: desde los cultivos agrícolas o los aprovechamientos forestales, hasta los residuos producidos en industrias agroalimentarias o forestales (Figura II-1).



Figura II-1. Distintos tipos de biocombustibles sólidos: astillas provenientes de poda de una conífera, paja de cereal y pellets de colza.

Los productos leñosos han sido la primera fuente de energía utilizada por el hombre hasta la revolución industrial, incluso hoy en día, para gran parte de la humanidad, especialmente en los países más desfavorecidos, sigue siendo la principal fuente de energía usada como combustible. Aunque generalmente este combustible sólido se utiliza directamente, también presenta otras formas de uso con fin energético que requieren de algún tipo de acondicionamiento especial. Las más generalizadas son las astillas, el serrín, el carbón vegetal, los pélets y las briquetas.

1.1.1.2 Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos (aceites y alcoholes) son una serie de productos de origen biológico que pueden sustituir a los derivados del petróleo, o bien pueden ser utilizados como aditivos para éstos en los motores. Este nombre hace referencia a los combustibles líquidos que proceden de materias primas producidas en el sector agrícola y que han sido transformadas hasta conseguir unas propiedades similares a las de los combustibles tradicionales. En la Unión Europea se les denomina, en muchas ocasiones, biocarburantes, debido a que la mayoría de las veces su uso energético se destina al transporte.

Aunque hay otros tipos de biocombustibles líquidos, los principales, reconocidos como tales por la legislación española actual, son el bioetanol y sus derivados, que sustituyen a la gasolina, y el biodiesel, que puede utilizarse, junto a, o en lugar del gasóleo.

El uso de los biocombustibles líquidos es igual de antiguo que el de los combustibles de origen fósil y como el de los motores de combustión. El primer motor diesel, diseñado por Rudolf Diesel en 1900, ya funcionaba con aceites vegetales, concretamente con aceite de cacahuete. Sin embargo, el petróleo y sus derivados irrumpieron rápidamente en el mercado debido a su bajo coste, su eficiencia, y su disponibilidad, lo que hizo que pasaran a ser los combustibles más utilizados desterrando así a los aceites vegetales.

Poco después, en 1908, Henry Ford diseñó el primer automóvil que esperaba utilizar el etanol como combustible. En la década de los años 20, la compañía americana "*Standard Oil Company*" comercializaba gasolina con un 25% de etanol fabricado a partir de maíz, pero problemas de almacenamiento y de transporte de la materia prima motivaron el abandono del proyecto. Posteriormente, otras iniciativas también se vieron abocadas al fracaso debido a la competencia que la producción de etanol tuvo con los bajos precios del petróleo.

A partir de la década de los 70, los conflictos bélicos sucedidos en Oriente Próximo han dirigido la evolución de los combustibles alternativos. En octubre de 1973 comenzó una fuerte crisis asociada a la guerra árabe-israelí. Durante esta **primera crisis del petróleo** los precios de la gasolina se doblaron en cuestión de tres meses, lo que hizo peligrar el suministro de los derivados del petróleo. Este hecho favoreció una búsqueda de combustibles alternativos, por lo que, a finales de la década, comenzó a comercializarse en EEUU la mezcla de gasolina y etanol, para diluir la gasolina y aumentar el octanaje. Brasil también desarrolló iniciativas para sustituir los combustibles fósiles, fabricando bioetanol proveniente de la caña de azúcar.

A principios de la década de los 80 se produjo la **segunda crisis del petróleo** que estuvo relacionada con los inicios de la guerra irano-iraquí, produciéndose una reducción de las extracciones del combustible que se recuperó a finales de la década. Este hecho, junto al abaratamiento del precio del crudo, hizo que se abandonaran las estrategias de cambio energético iniciadas en la década anterior. La década de los 90 comenzó con una **nueva crisis**, esta vez derivada de la invasión de Kuwait por Irak

(Guerra del Golfo). El precio del petróleo volvió a ser inestable y a encarecerse y los biocombustibles regresaron al escenario energético de muchos países.

La tendencia de los precios del petróleo durante el siglo XXI, ha sido siempre ascendente, especialmente durante la denominada **burbuja de precios 2004-2008**. Esta espectacular subida de precios intentó argumentarse por los huracanes que afectaron al golfo de México, especialmente el huracán Katrina, ya que en esta zona es donde existe una gran concentración de refinerías. Sin embargo, muchos expertos piensan que este incremento en los precios ha sido debido a la especulación, causada principalmente, por el fuerte crecimiento de la demanda de carburantes prevista para China e India. En el año 2009, esta crisis en principió finalizó, ya que la búsqueda de combustibles alternativos había obligado a que la demanda de combustibles fósiles disminuyera. Pero lamentablemente, y a pesar de la tendencia ascendente mundial en el consumo de biocombustibles, la reactivación de las economías de los países desarrollados y el aumento de la demanda por parte de las economías emergentes, unido a los sucesos de la primavera árabe, han vuelto a derivar en un aumento de la demanda, y por tanto, de los precios de los combustibles fósiles.

Según el PER 2011-2020, y de acuerdo con los datos de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), los biocarburantes han cubierto en el año 2010 el 2,08 % de la oferta mundial de petróleo (entendida como suma de petróleo y biocarburantes), porcentajes que ascienden hasta un 3,44 % si nos centramos en los países que no pertenecen a la OPEP. En años venideros, se espera que estos porcentajes sigan aumentando impulsados por los gobiernos de los países que buscan una independencia energética y luchan contra el cambio climático.

1.1.1.3 Biocombustibles gaseosos

El proceso de digestión anaerobia ocurre de forma espontánea en la naturaleza, degradando la materia orgánica y produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos, o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes.

Aunque el gas natural, formado mayoritariamente por gas metano, ha sido utilizado por los pueblos chinos y persas desde hace miles de años para generar temperatura, no fue hasta el **siglo XVIII** cuando Volta investigó e identificó el gas de los pantanos. Posteriormente, en 1804, Dalton descubrió la composición química del metano y no fue hasta mediados del siglo XIX cuando se tuvo certeza de la participación de organismos vivos en el proceso de su formación.

En la primera mitad del **siglo XX** se llevaron a cabo numerosas experiencias piloto y en laboratorio que alcanzaron especial importancia durante la Segunda Guerra Mundial, debido a la escasez de combustibles. Al finalizar la guerra se volvió a disponer de combustibles fósiles y la mayoría de las instalaciones quedaron abandonadas.

A partir de la década de los 60, en la India, se impulsó la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino, con el doble objeto de aprovechamiento energético

y utilización de los subproductos fertilizantes que se obtienen con el proceso. Así, y todavía en la actualidad, los biodigestores familiares de bajo costo están ampliamente implantados en la mayoría de los países del sureste asiático, y en alguno de Sudamérica, como Argentina, Cuba, Colombia y Brasil. El desarrollo de las tecnologías de obtención de biogás en estos países, ha sido mayor en zonas rurales ya que es en esas zonas donde se cuenta fácilmente y en cantidad con diferentes tipos de desechos orgánicos (ej. estiércol).



Figura II-2. Biodigestor de bajo costo en Bolivia (Fuente: http://tallerbiogas.blogspot.com.es)

En los países industrializados la historia de la tecnología de la biometanización ha sido diferente y su motivación ha sido resultado de intereses medioambientales más que energéticos, utilizándose como un método clásico de estabilización de lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas.

A partir de la **primera crisis energética** de principios de los años 70, y durante **segunda crisis del petróleo** en la década de los 80, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a adquirir importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales. No obstante, con la bajada del precio del petróleo, y al igual que sucedió con los biocombustibles líquidos, el interés por esta tecnología volvió a decaer, aunque algunos países como Dinamarca, han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables para disminuir las emisiones netas de gases de efecto invernadero.

1.1.2 Clasificación según su generación

En función de la materia prima de la que provengan estos biocombustibles y de los procesos que se han utilizado para obtenerlos se ha realizado una clasificación por generaciones, llegándonos por la cuarta generación. De todas ellas, la **primera generación**, que consiste en combustibles obtenidos a partir de cultivos agrícolas alimentarios ha sido la más polémica. La problemática social de esta generación de biocombustibles reside básicamente en la subida desmesurada de los productos agrarios como consecuencia del aumento de su demanda, lo que dificulta a determinados países el acceso a alimentos básicos. Por otro lado, esta generación de

combustibles también presenta daños ambientales provocados por la deforestación, de selvas tropicales en la mayoría de las ocasiones, que causan algunos cultivos a gran escala.

La **segunda generación** de biocombustibles no se basa en la elaboración de éstos a partir de cultivos comestibles, sino en sus residuos o en los residuos de las industrias agroalimentarias. También se consideran biocombustibles de segunda generación aquellos que se obtienen a partir de cultivos agro-forestales no destinados a la alimentación. En este caso, el problema que plantean es su bajo rendimiento económico ya que la materia prima posee altos contenidos lignocelulósicos de difícil degradación que proporcionan poca eficiencia en su conversión al diesel o al etanol.

A esta generación de biocombustibles también se le atañen problemas ambientales y sociales debido a la competencia por las superficies destinadas a cultivo de especies para consumo humano. Asimismo, su producción a gran escala podría comportar deforestación, lo mismo que sucede con los combustibles de primera generación.

Para evitar estos problemas, en la actualidad se está invirtiendo en la generación de los denominados biocombustibles de **tercera generación**. Su elaboración utiliza metodologías de producción similares a los de segunda generación, pero empleando como materia prima cultivos bioenergéticos especialmente diseñados o adaptados para mejorar la conversión de la biomasa a biocombustibles. Estas mejoras o adaptaciones utilizan frecuentemente técnicas de biología molecular, como por ejemplo, el desarrollo de árboles con porcentajes de lignina bajos, que reducirían los costes y mejorarían la producción de etanol, o la modificación del maíz para que contenga celulasas integradas.

Y por último, los biocombustibles de **cuarta generación** buscan la adaptación de la materia prima a mejorar la eficiencia en la captación y almacenamiento de CO_2 (CAC). Estos biocombustibles aun no son comerciales, aunque podemos encontrar plantas piloto en Brasil y EEUU.



Figura II-3. Cultivo de combustibles de primera (soja), segunda (panizo), tercera (microalgas) o cuarta generación (chopos modificados genéticamente).

1.2 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA

Las tecnologías de conversión para aprovechar la energía de la biomasa incluyen desde los procesos más simples, como la tala de árboles y su posterior quema, hasta los más complejos, como convertir los azúcares de un cultivo en combustibles líquidos (Figura II-4). Así, podemos clasificar los procesos de conversión de la biomasa en:

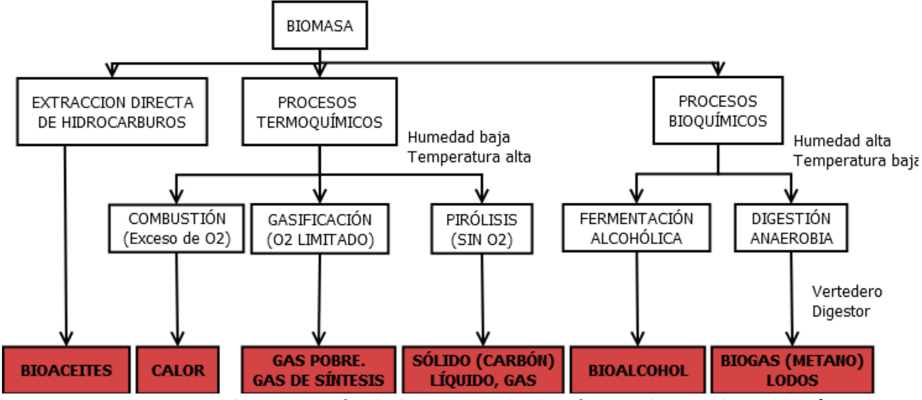


Figura II-4. Procesos de conversión de biomasa en energía o en biocombustibles (Fuente: Elaboración propia)

1.2.1 Extracción directa de hidrocarburos

Los aceites vegetales y las grasas animales pueden transformarse en una mezcla de hidrocarburos similar al diesel a través de un complejo proceso de esterificación, eliminación de agua, transesterificación, y destilación con metanol, al final del cual se obtiene también glicerina y jabón.

1.2.2 Procesos termoquímicos

Se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están muy desarrollados para la biomasa seca, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido. Se utilizan los procesos de:

1.2.2.1 Combustión

Proceso que consiste en la oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire. En esta reacción se libera H_2O y gases carbónicos (CO_2 y CO), y la energía resultante puede ser utilizada para calefacciones domésticas y para la producción de calor industrial.

1.2.2.2 Pirólisis

Se trata de una combustión incompleta de la biomasa a alta temperatura (500ºC) y en condiciones anaerobias. Se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Este método libera también un gas pobre, mezcla de monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO_2), de hidrógeno (H_2) y de hidrocarburos ligeros, además de alquitrán y

carbón (*char*). El gas liberado, de poco poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

Una variante de la pirólisis, es la pirólisis *flash* que se realiza a una temperatura mayor, alrededor de 1.000ºC, y tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. Se optimiza de esta forma el gas pobre. Las instalaciones en la que se realizan la pirólisis y la gasificación de la biomasa se llaman gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente, o puede servir como base para la síntesis de metanol, el cual podría sustituir a las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

1.2.2.3 Gasificación

En este proceso, se produce una conversión de la biomasa en un gas combustible, mediante una oxidación parcial a temperaturas elevadas. Como se ha mencionado anteriormente, en la tecnología convencional de combustión la biomasa se quema utilizando un exceso de aire para asegurar una combustión completa; sin embargo en el proceso de gasificación la cantidad de oxígeno generalmente es de 1/5 a 1/3 de la cantidad requerida teóricamente para la combustión completa. El principal producto del proceso es un gas combustible, cuyo poder calorífico varía dependiendo del agente gasificante utilizado.

1.2.3 Métodos biológicos

Destacan las fermentaciones alcohólicas y las fermentaciones metánicas.

1.2.3.1 Fermentaciones alcohólicas

Proceso que se basa en el almacenamiento de la energía, en forma de hidratos de carbono por parte de las plantas, a partir de los cuales puede obtenerse alcohol por fermentación, siguiendo diferentes etapas y en función del tipo de biomasa de partida.

1.2.3.2 Fermentación metánica (digestión anaerobia)

Consiste en una digestión anaerobia de la biomasa a través de bacterias. Este proceso es idóneo para transformar la biomasa húmeda (>75% de humedad relativa), especialmente aquella proveniente de los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.

En el siguiente diagrama (Figura II-5), pueden verse resumidos los diferentes tipos de recursos y el tipo de tratamiento o procesado que puede llevarse a cabo para obtener un determinado aprovechamiento energético:

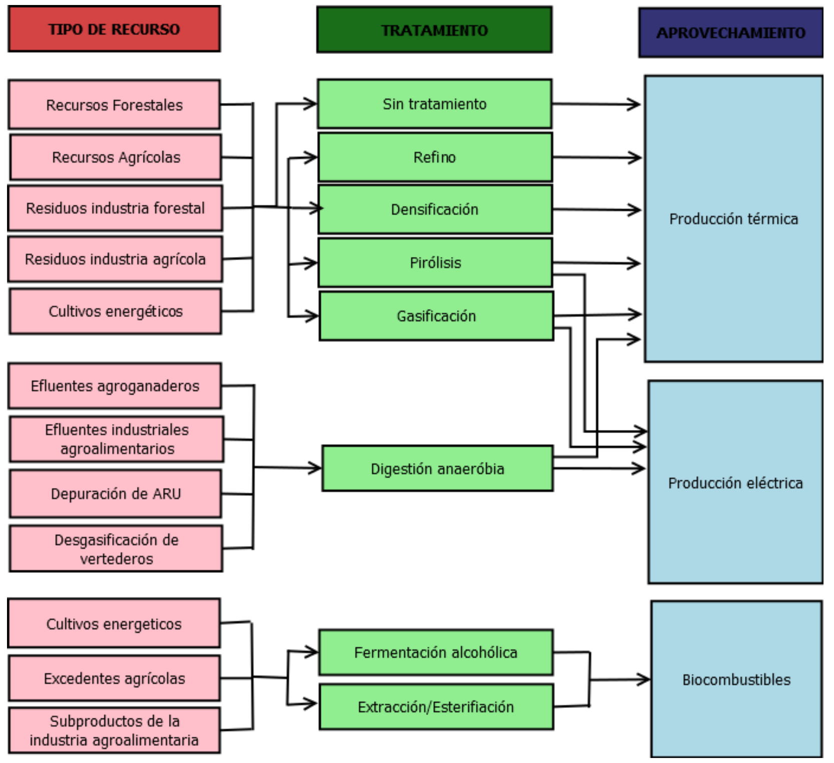


Figura II-5.- Procesos industriales de producción de biocarburantes y energía a partir de distintos tipos de materias primas (Fuente: Modificado de PBCyL 2011)

1.3 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA. 2011. Estudio básico sobre el sector de los biocarburantes. Consejería de Economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía.

Camps M, Marcos F. 2008. Los biocombustibles. Mundi-Prensa, Madrid. 384 pp. ISBN 978-84-8476-360-4

DIR 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

Fernández JM. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. AMV Ediciones, Madrid. 319 pp. ISBN 978-84-96709-62-1

Navarro JM. 2011. Análisis de viabilidad económica de biocombustibles de cuarta generación. PFC. Universidad pontificia Comillas. ICAI. Madrid.

PBCyL. 2010. Plan Regional de Ámbito sectorial de la bioenergía de Castilla y León.

PER 2011-2020. Plan Energías Renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España.

2 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Se define biocombustible sólido a todo producto derivado de la biomasa sólida que es susceptible de ser utilizado de forma directa en los procesos de conversión energética. Los más importantes son los de tipo primario, constituidos por materias lignocelulósicas procedentes del sector agrícola o forestal y de las industrias de transformación que producen residuos de dicha naturaleza. La paja, los restos de poda de vid, olivo y frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas, clareos o claras de las masas forestales, son materias típicas para la elaboración de biocombustibles sólidos. Así mismo, las cáscaras de frutos secos y huesos de aceitunas, los orujillos procedentes de la extracción del aceite en las almazaras y los restos de las industrias del corcho, madera y mueble, constituyen una buena materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos (ver Bloque I de este documento). Otro grupo de biocombustibles sólidos, que requieren de una transformación para poder ser utilizados como combustible, y que serán los tratados en este tema, lo constituyen las astillas, el carbón vegetal, los pélets y las briquetas.

Las **astillas** son porciones de madera y corteza que constituyen un material adecuado para ser empleado en hornos cerámicos, de panadería, viviendas individuales, calefacción centralizada de núcleos rurales o pequeñas industrias.

Otro aprovechamiento energético de la madera y residuos forestales lo constituye el proceso de pirolisis (carbonización), por el que se obtiene **carbón vegetal**. Hasta la llegada del carbón fósil a finales del siglo XIX, la industria siderúrgica utilizó carbón vegetal como combustible en los altos hornos. Así mismo, el carbón vegetal se ha empleado tradicionalmente como elemento de calefacción en el sector doméstico. Hoy en día, este producto, de alto valor añadido, se utiliza todavía como combustibles en países subdesarrollados, si bien su uso energético está decreciendo y encuentra mayores aplicaciones para la producción de carbón activo, de aplicación cada vez más amplia en las industrias siderúrgica, agroalimentaria, farmacéutica y de tratamiento de aguas. El carbón vegetal también se emplea en la industria química para la obtención de sulfuros de carbono, ácido acético y acetileno, carburos de calcio y cloruro de vinilo y para la fabricación de ciertos silicatos artificiales y ciertos vidrios de calidad.

Los métodos industriales de briquetado datan de la segunda parte del siglo XIX. Desde entonces el uso de las **briquetas** ha estado ligado a períodos de escasez de combustible y a épocas de crisis. Durante la II Guerra Mundial la fabricación de briquetas a partir de residuos de madera y otros desperdicios se encontraba muy extendida en Europa y América. Tras la guerra las briquetas fueron apartadas del mercado por los hidrocarburos baratos. De nuevo durante los períodos de alto precio de la energía, como los años 70 y principios de los 80, el uso de briquetas se revitaliza, principalmente en Escandinavia, los EEUU y Canadá. Actualmente la tendencia es

producir briquetas de combustible de bajo coste económico, a partir de residuos no utilizados para otros usos de mayor valor.

La historia de fabricación de **pélets** es mucho más reciente que la de las briquetas. Si bien ya se utilizaban las prensas de peletizado para la fabricación de alimentos para el ganado, no fue hasta el 1961 cuando comenzó su densificación con fines energéticos. Ese año, la sociedad Sprout-Waldon Co, fabricante de prensas, creó una instalación completa para granular la corteza de roble en Tenesse (EE.UU.). En 1967, el laboratorio de investigaciones forestales vinculado a la Universidad de Oregón, procedió a unos 200 ensayos de granulación de corteza y de madera. En 1977, GUNNEMAN creó la BIO SOLAR RESEARCH en Eugenia, y lanzó una experiencia piloto en Browneville (Oregón). En el mismo año, registra una patente de granulación a la que da el nombre de WOODEX. Se señala que la materia debe estar triturada (tamaño de las partículas inferior al 85% de la dimensión mínima de los pellets), seca o humidificada (humedad comprendida entre 16 y 28%) y calentada a una temperatura suficiente (de 163 a 176 ºC) durante la granulación con el fin de garantizar la calidad del producto final.

2.2 ASTILLAS

Las astillas son un material orgánico formado generalmente por madera y corteza, que se obtiene mediante el fraccionamiento de la biomasa de origen forestal. Su utilización con fines energéticos puede realizarse mediante combustión directa o pueden servir de materia prima para fabricar otros biocombustibles (pélets y briquetas). Pueden provenir de cuatro tipos de fuentes:

- **Residuos forestales y agrícolas**
- **Cultivos leñosos energéticos**
- **Industrias forestales de primera y segunda transformación**
- **Residuos de industrias agroalimentarias**



Figura II-6. Astillado en campo

2.2.1 Propiedades físicas

2.2.1.1 Forma, tamaño y aspecto

Las astillas poseen una forma plana, siendo de mayor longitud (3-10 cm) y anchura (2-6 cm) que el espesor (<2 cm). El tamaño de las astillas y su uniformidad son muy variables y dependen de la astilladora utilizada. Cuanto menor es el tamaño de las astillas, mayor es la densidad y superficie específica que presentan, pero su obtención es más cara.

2.2.1.2 Densidad y superficie específica

La densidad de las astillas suele ser muy baja y oscila entre 0,25 y 0,35 kg/dm^3. Debe distinguirse la densidad real de la aparente, que es con la que realmente se trabaja en el transporte y manipulación de astillas.

En cuanto a la superficie específica, cuanto mayor es mejor se efectuará la reacción exotérmica de combustión, ya que habrá más superficie en contacto con el comburente (normalmente aire). A menor tamaño de astilla, mayor superficie específica.

2.2.1.3 Humedad

Al igual que sucede con las leñas, no conviene que las astillas estén húmedas ya que parte del calor que generan en la combustión se emplearía en secarlas. Por otro lado, y en relación a las leñas, el menor tamaño de las astillas hace que su secado sea difícil y/o caro, aunque se recomienda hacerlo porque se mejora enormemente su poder calorífico, lo cual resulta rentable.

2.2.2 Propiedades químicas

2.2.2.1 Composición química

La composición química de las astillas estará condicionada por la materia prima de la que parten. Si provienen exclusivamente de madera, estarán formadas en su totalidad, y en la mayoría de los casos, por carbono, hidrógeno y oxígeno, pero si también provienen de corteza, habrá mayores porcentajes de compuestos basados en el nitrógeno y en el azufre.

Además, y debido a su manejo y transporte, las astillas pueden estar acompañadas de impurezas que generalmente son áridos. Estas impurezas, además de dificultar la combustión produciendo más cenizas, podrían dañar la maquinaria utilizada para la fabricación de pélets y briquetas si el fin de las astillas fuera este.

2.2.2.2 Poder calorífico

El poder calorífico que mide el calor desprendido por unidad de masa (kJ/kg ó kcal/kg) dependerá de la biomasa de la que se parte. Si las astillas proceden de leñas o residuos de industrias forestales de primera y segunda transformación su poder calorífico es el siguiente:

$$PCI_a = m \cdot PCI_m + c \cdot PCI_c + i \cdot PCI_i$$

donde: PCI_a, PCI_m, PCI_c y PCI_i es el poder calorífico inferior de las astillas, madera, corteza e impurezas respectivamente (kcal/kg)
m es el tanto por uno en peso de la madera
c es el tanto por uno en peso de la corteza
i es el tanto por uno de impurezas (0 en el caso de no haberlas)

2.2.3 Propiedades físico-químicas

2.2.3.1 Variables de combustibilidad

Estas variables se refieren a los parámetros que más influyen en el proceso de combustión, como el coeficiente de conductividad térmica, la inflamabilidad, los tiempos y temperaturas de inicio de combustión, etc. La inflamabilidad y la combustibilidad de las astillas son dos características que mejoran respecto a las leñas, pero esto supone que el almacenamiento de astillas es más peligroso que el de leñas por su mayor peligro de incendio.

2.2.3.2 Potencia calorífica

Esta característica está estrechamente ligada a la naturaleza de la astilla y al lugar donde se va a producir la combustión. Dependerá, por tanto, del poder calorífico de la materia prima, que varía en función de la composición química. A mayor poder calorífico, mayor potencia calorífica.

La potencia calorífica también estará relacionada con el coeficiente de conductividad térmica, muy relacionado con la densidad de la astillas. A mayor densidad, menor coeficiente. En cambio, si la densidad de las astillas es baja y existen productos resinosos (ej. maderas de coníferas), la combustión será más rápida.

Por último, para que se produzca una combustión satisfactoria, es necesario que el horno o caldera donde se realice posea una correcta alimentación de aire. Si no se produce una combustión completa, además de disminuir la potencia calorífica se incrementan los niveles de contaminación.

2.2.4 Proceso de astillado

En general, el proceso de astillado consta de tres fases:

- **Fase en campo:** El astillado se produce in situ, alimentando la astilladora de troncos y/o restos de poda.
- **Fase de transporte:** Transporte de la astilla al centro consumidor o a la planta de almacenamiento y/o astillado. El transporte se realiza en contenedores de diversos tamaños.
- **Fase de planta:** Se realiza el astillado y la clasificación de las astillas en planta.

La maquinaria más extendida para producir astillas es la astilladora, que puede clasificarse de diferentes formas en función de:

- **Su instalación:** Pueden ser fijas o móviles (autopropulsadas, montadas, arrastradas o acopladas). Las fijas suelen utilizarse en las plantas de astillado. Las móviles son conocidas también como clásicas y pueden ir montadas en camiones con mecanismos para su manejo totalmente independientes del sistema motriz del camión. Las más utilizadas son las de tipo arrastrado, por ejemplo, por un tractor (Figura II-7).
- **Mecanismo de astillado:** Pueden ser de tambor, de cuchilla o de disco. Las de tambor poseen 3 ó 4 cuchillas que cortan la biomasa de su interior al girar. El astillado de disco consiste en un disco con cuchillas y agujeros (que hacen de criba). Si las astillas formadas no pasan la criba permanecen en el disco y vuelven a ser cortadas de nuevo hasta conseguir el tamaño deseado.
- **Forma de alimentación:** Puede ser manual o mecánica. La segunda se realiza con una pluma o grúa, y se acompañan de unos rodillos rugosos o dentados (metálicos o de goma) que facilitan la alimentación.
- **Salida de la astilla:** Por gravedad o por ventilación. El primer método es más barato pero con él no se puede decidir el destino final de la astilla.



Figura II-7. Astilladora fija en planta (izquierda) y trituración de residuos en monte (derecha) (Fuente: Ana I de Lucas y Carlos del Peso)

2.3 CARBÓN VEGETAL

El carbón vegetal es un combustible sólido que presenta un contenido muy elevado de carbono por lo que su poder calorífico es muy superior al de la madera (puede llegar hasta 35 MJ/kg). Se produce gracias a una combustión incompleta (hasta temperaturas de 400 a 700 ºC), de madera y otros residuos vegetales y es difícilmente alterable, además de no verse afectado por hongos e insectos xilófagos. El carbón vegetal es una fuente de energía renovable, lo que aumenta su interés como combustible.

Hay distintos tipos de carbón vegetal y son especialmente apreciados para su uso doméstico (principalmente en barbacoas). Su uso está muy extendido en países en vías de industrialización. Se suelen presentar ensacados y suelen ser de distintas procedencias (carbón vegetal de encina, carbón vegetal de cabracho argentino o carbón vegetal de fibra de coco de alto rendimiento) (Figura II-8).




Figura II-8: Carbón vegetal proveniente de leña (izquierda) y carbón vegetal de fibra o cáscara de coco (derecha)

2.3.1 Propiedades físicas

2.3.1.1 Forma, tamaño y aspecto

El carbón vegetal presenta formas muy variadas, en función de si la leña de origen está troceada o no. Su color es negro brillante, debido a los líquidos piroleñosos que se depositan en la superficie de la leña al realizarse el carboneo. El tamaño de este biocombustible sólido es similar al de la leña original, aunque puede fraccionarse para que el transporte resulte más cómodo. La leña que se utiliza como materia prima suele tener un diámetro de entre 5 y 50 cm, troceándose si es mayor. Previo empaquetado, se realiza una homogeneización del carbón a través de cribas o tamices.

2.3.1.2 Densidad y Superficie específica

Está condicionada por la materia de origen, pero los valores medios de densidad aparente oscilan entre 0,17 kg/dm^3 y 0,5 kg/dm^3. En general, las maderas de frondosas poseen mayores densidades que las de coníferas. Además, podemos obtener mayores densidades del carbón si se somete a la materia prima a una presión durante la carbonización.

La superficie del carbón vegetal por unidad de volumen es muy elevada (160-436 m^2/g) debido a la gran cantidad de poros que posee. Esta porosidad hace que el carbón sea un material muy interesante como filtro para absorber gases contaminantes y evitar vertidos de las chimeneas en las industrias.

2.3.1.3 Humedad

Un carbón vegetal secado al aire se considera seco si la humedad en base húmeda está entre 4 y 9,5%, húmedo si se encuentra entre el 10 y el 15% y mojado si su humedad es superior al 15%. El que se comercializa tiene una humedad relativa en torno al 6-10% en base seca (e.d. calculada después de que el carbón se haya secado en estufa a una temperatura de 104ºC).

2.3.1.4 Resistencia a la compression

Esta propiedad es muy importante ya que si la resistencia a la compresión del carbón es pequeña, éste se convierte en carbonilla y polvo al ser manejado. Este parámetro se mide en dos direcciones: paralela a la fibra (R), o perpendicular a la fibra (R'). Se aconseja que la R' sea superior a 9 kg/cm^2.

2.3.2 Propiedades químicas

2.3.2.1 Composición química

La composición principal del carbón vegetal dependerá de la materia prima utilizada y del método y temperatura de carbonización, pero en general, está formado por carbono, hidrógeno, oxígeno y trazas de nitrógeno. Cuanto mayor contenido en carbono posea la materia original, mayor poder calorífico presentará el carbón vegetal, que será mucho mayor que el del resto de biocombustibles sólidos.

2.3.2.2 Poder calorífico

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el poder calorífico del carbón vegetal es superior al de la madera, las leñas y cortezas, astillas, pélets y briquetas, pudiendo llegar a alcanzar hasta 35 MJ/kg. Este parámetro está fuertemente ligado a la temperatura utilizada en el carboneo, ya que cuando esta es mayor, el porcentaje de carbono, y por tanto, el poder calorífico será mayor, pero disminuye el rendimiento (e.d. la cantidad de carbón que se forma por kg de leña original).

2.3.3 Proceso de carbonizado

Se denomina pirólisis o carbonización al proceso de calentamiento de materiales orgánicos presentes en la biomasa en ausencia de aire. Generalmente, se utiliza el término pirolisis cuando dicho proceso se enfoca a la obtención de gases y aceites, y carbonización, cuando el proceso se dirige hacia la obtención de productos sólidos, como es el caso del carbón vegetal, aunque estrictamente, la carbonización es un tipo de pirolisis extrema y anhidra de materiales sólidos.

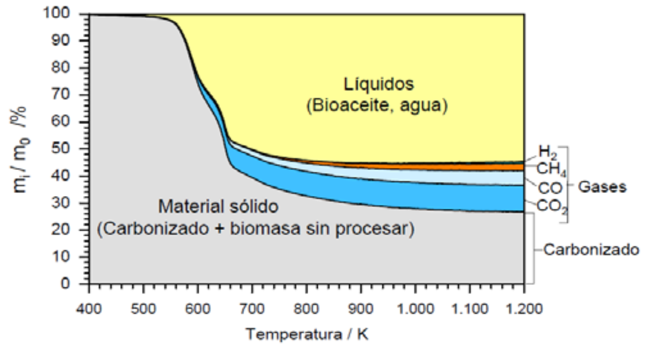


Figura II-9. Ejemplo de distribución de los productos generados durante el proceso de carbonización (Fuente: Rincón et al. 2011)

Mediante el proceso de carbonización se obtienen (en función de la temperatura alcanzada, Figura II-9) productos sólidos, líquidos y gaseosos, que pueden utilizarse directamente como combustible o pueden procesarse para la obtención de productos químicos y otro tipo de combustibles.

Como puede observarse en la tabla II-1, la mayoría de las reacciones de pirolisis ocurren por debajo de unos 800 K (527ºC) de temperatura. La fracción gaseosa, denominada vapor piroleñoso, está compuesta principalmente por CO_2 y CO, y también existen pequeñas proporciones de CH_4 y H_2. La proporción de productos obtenidos (carbonizado, alquitrán, agua y gas) dependen de la materia de origen, aunque de forma general se puede afirmar que si la materia prima cuenta con alto contenido en lignina, se consiguen rendimientos más elevados. En la siguiente tabla pueden observarse los diferentes rendimientos que se obtienen para diferentes especies forestales:

Tabla II-1. Rendimientos de carbonización para varias especies (%)(Fuente: CIEMAT 1995)

PRODUCTO	**ESPECIES FORESTALES RESINOSAS**		**ESPECIES FORESTALES FRONDOSAS**	
	Pino	***Abeto***	***Abedul***	***Haya***
Char o carbón	37,8	37,8	31,8	35
Alquitrán	11,8	8,1	7,9	8,1
Gas	14,7	14,9	14,0	15,8
Etanol	3,5	3,2	7,1	6,0
Metanol	1,0	0,9	1,6	2,1
Agua	22,3	25,7	27,8	26,7

El proceso general de carbonización de biomasa consta de tres fases:

- **Deshidratación de la materia prima:** La madera es secada con una temperatura próxima a los 100ºC hasta conseguir un contenido de humedad igual a 0. Posteriormente la temperatura sigue aumentando hasta alcanzar unos 280ºC. La energía de esta etapa procede de la combustión parcial de la madera, por lo que es una reacción endotérmica, que absorbe energía.
- **Fragmentación de la madera:** Cuando la madera está seca y adquiere temperaturas próximas a los 300ºC comienza a fraccionarse de forma espontánea, produciendo carbón y vapor de agua, ácido acético y compuestos químicos más complejos (en forma de alquitranes y gases no condensables como H_2, CO y CO_2). Como es necesario el aporte de aire en el sistema para que se queme parcialmente la madera, también habrá presencia de nitrógeno en estos gases. Esta reacción es exotérmica y continúa hasta que queda solo el residuo carbonizado: carbón vegetal.
- **Eliminación y descompresión de los alquitranes:** El proceso, de forma espontánea, se detiene cuando la temperatura alcanza unos 400ºC, pero este carbón contiene todavía demasiados residuos alquitranosos junto con las cenizas de la madera original. Por tanto, se realiza un calentamiento hasta alcanzar temperaturas de unos 600ºC que hacen que aumenten las proporciones de

carbono fijo, eliminando y descomponiendo aun más los alquitranes. Con estas temperaturas se alcanza un porcentaje de carbono fijo cercano al 90% y un 10% de materiales volátiles, con un rendimiento de carbón sobre masa seca superior al 30%.



Figura II-10. Carboneras encendidas y pirólisis de leña (Fuente: http://www.sasua.net/estella/articulo.asp?f=carboneros)

2.3.4 Métodos para obtener carbon vegetal

Los diferentes tipos de tecnologías de carboneo pueden clasificarse, ya sea en función de la barrera de separación entre la madera y el exterior (ej. tierra, ladrillos, cemento armado, combinación de ladrillos-acero o solo acero), o en función del origen del calor empleado para secar y calentar la leña (propia madera u otro combustible).

Los métodos más sencillos son los artesanales, que precisan sólo de herramientas como hachas y horcas, requiriendo tiempos para obtener el carbón vegetal superiores a un mes. En estos casos, la barrera física es tierra. Por el contrario, las tecnologías más evolucionadas utilizan hornos con sistemas de control más o menos sofisticados. A saber:

2.3.4.1 Tecnologías artesanales

Son aquellas que no precisan de ninguna maquinaria compleja y que se utilizan desde siempre para producir carbón vegetal. Destacan entre ellas:

2.3.4.1.1 Parva tradicional

La parva de carbonización es una técnica bastante antigua y consiste en una estructura en forma tronco-cónica que posee un diámetro inferior que puede oscilar entre los 2 y los 30 m, un diámetro superior de entre 1 y 15 m y una altura variable. En España se conoce con el nombre de carbonera o boliche. La madera se va apilando de forma en que los trozos de mayor tamaño se colocan en la base, evitando huecos demasiado grandes, o rellenando estos espacios con biomasa de menor tamaño (Figuras II-11a). Se deberá intentar dejar pequeños huecos que permitan la entrada y la salida de aire. Después de unos días se realizará el tapado de la parva, con una capa de tierra variable que puede oscilar entre 10 y 30 cm (Figura II-11b).





Figura II-11. a) Leña preparada para levantar una carbonera. Al fondo, una carbonera montada y preparada para ser cubierta. b) Parva cubierta de paja para impedir la penetración del oxígeno y recubrimiento con tierra (Fuente: www.estella.com.es)

El control del oxígeno y de la temperatura en este tipo de estructuras es bastante complicado por lo que la calidad y la homogeneidad del carbón que se obtiene suelen ser muy irregulares y completamente dependientes de la destreza del operario.

2.3.4.1.2 Parva sueca

En Suecia, y para facilitar la entrada de aire, se mejoró la estructura anterior colocando una rejilla cuadriculada formada por troncos separados entre sí. Sobre esta se apilaba la leña. Además se añadió una chimenea conectada con un conducto hueco en el interior de la parva. Gracias a estas dos mejoras, la calidad del carbón vegetal aumentó considerablemente.

2.3.4.1.3 Fosa de tierra

Este sistema, y como su propio nombre indica, emplea también la tierra como barrera física entre la leña y el aire. Es un procedimiento muy utilizado en países africanos como Ghana, y consiste en excavar una fosa donde se echará la madera a carbonizar y se tapará con tierra vegetal. El carbón vegetal que se obtiene con esta tecnología es de baja calidad y muy irregular, ya que el carbón inicial está más quemado, contiene volátiles y puede quedar convertido en cenizas. En cambio, la parte superior de la fosa se mantiene solo parcialmente carbonizada (Figura II-12a).

2.3.4.2 Tecnologías semi-industriales

La barrera de separación entre la madera y el aire está formada por piezas de cerámica (ej. ladrillo) o metálicas (ej. acero). Existen diversos hornos entre los que cabe reseñar:

2.3.4.2.1 Hornos metálicos españoles

Son transportable y poseen una serie de ventajas como su rentabilidad (transportar el producto final es más barato que transportar la madera), son de diversos tamaños (ajustándose a las necesidades y al volumen de materia prima) y su coste es competitivo (Figura II-12b).



Figura II-12. a) Fosa de tierra; b) Horno metálico transportable (Fuentes: www.fao.org y http://temuco.olx.cl)

2.3.4.2.2 Horno media-naranja argentino

Este tipo de horno está hecho de ladrillo y tiene forma, como su propio nombre indica, de media naranja. Posee tamaños variables, con diámetros que oscilan entre los 2 a los 16 metros. Las puertas de alimentación de materia prima y descarga están colocadas perpendicularmente a la dirección del viento para evitar la entrada de mucho aire. Proporciona un carbón de alta calidad (Figura II-13a).

2.3.4.2.3 Horno colmena brasileño

Es un horno de ladrillo con forma cilíndrica. La duración de los procesos de carbonización precisa de menos tiempo en comparación con los métodos tradicionales y con él se consiguen rendimientos aceptables (Figura II-13b).

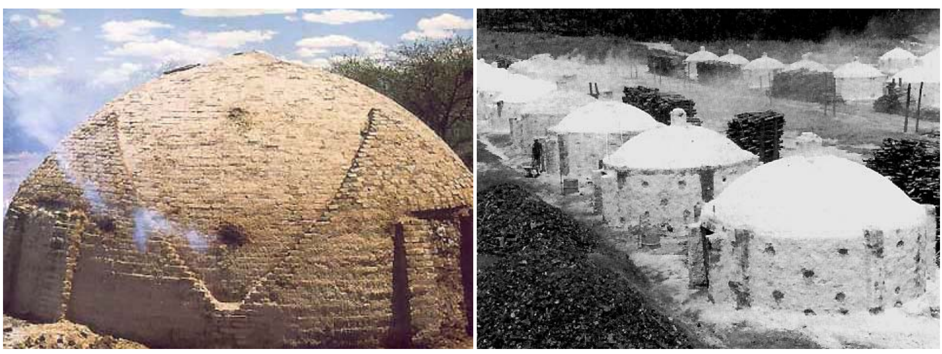


Figura II-13. a) Horno media-naranja argentino y b) batería de hornos colmena brasileños (Fuentes: www.fuegosdelsursrl.com.ar y www.fao.org)

2.3.4.3 Tecnología industrial

2.3.4.3.1 Hornos industriales

Se denomina tecnología industrial en la obtención de carbón vegetal a los procesos continuos y de alta producción que presentan sistemas de control más o menos

sofisticados. En general, este tipo de procesos industriales a partir de leña consta de tres etapas:

- **Recepción y preparación de la leña:** La madera procedente de podas, claras, clareos, etc. se trocea al tamaño adecuado y se apila para ser cargada en el horno.
- **Carbonización continua:** Se alimentan los hornos por su parte superior. Los hornos constan de controles de temperatura en su interior. En la parte inferior del horno, donde el carbón vegetal ya está formado, se enfría mediante circuitos de agua refrigerante.
- **Acondicionado y envasado:** Cuando se extrae el carbón del horno, se coloca en cajones que posteriormente se tapan con tierra, para conseguir que se siga enfriando en ausencia de oxígeno y así evitar el riesgo de combustión. Posteriormente, se separa el carbón de la carbonilla y se clasifica según las normas granulométricas preestablecidas.

La mayor ventaja de los hornos industriales (Figura II-14a) es la uniformidad en la calidad del carbón obtenido, que suele presentar un contenido en carbono fijo superior al 80% y unos rendimientos superiores al 25%. Como inconveniente hay que destacar que, al tratarse de instalaciones fijas, los gastos de instalación iniciales son superiores a otras tecnologías y los gastos de transporte son también más elevados al tener que transportarse la madera en lugar de la materia prima obtenida.

2.3.4.3.2 Carbonización hidrotermal

A mayor escala, se comenta como ejemplo la primera planta de comercialización y de I+D hidrotermal de biomasa a escala industrial instalada recientemente en el municipio valenciano de Náquera (Valencia) (Figura II-14b). Esta planta tiene la capacidad de tratar 2.000 t al año de restos de poda de jardinería y de aprovechamientos forestales. También puede procesar otro tipo de materias primas como restos agrícolas, de poda de frutales o restos de verduras.

El proceso tiene lugar en un reactor de flujo invertido en cuyo interior hay un medio líquido, unas condiciones de proceso de 20 bar de presión, 180-200 ºC de temperatura, y un catalizador específico para cada tipo de biomasa. Las condiciones de proceso se alcanzan gracias a una caldera alimentada con carbón producido en la planta. En estas condiciones, tiene lugar una fase de monomerización de la materia orgánica, seguida de un proceso de polimerización tras el que se obtiene un carbón deshidratado, con un elevado poder calorífico y agua por unión de las moléculas de H y O que han perdido las cadenas de hidrocarburos. Al finalizar el proceso, que puede durar 10 horas, el carbón inerte sale del reactor mezclado con agua. Tras la separación del agua, el carbón sigue "mojado" pero molecularmente seco.

El carbón seco obtenido es muy ligero y fácil de moler. Es apto para combustión en calderas industriales, para co-combustión en centrales térmicas, y también se puede peletizar, solo o con serrín de madera para aumentar su poder calorífico. El único subproducto obtenido del proceso es agua apta para fertilizar.



Figura II-14. a) Horno industrial de carbonización b) Planta de carbonización hidrotermal de biomasa a escala industrial en Náquera (Valencia) (Fuentes: http://spanish.alibaba.com y http://www.expobioenergia.com)

2.4 PELETS Y BRIQUETAS

El objetivo final de los procesos de peletización y briquetado consiste en obtener un producto final de mayor densidad que los productos iniciales, de ahí el nombre de densificación. Los productos obtenidos, al tener mayor densidad, se transportarán ocupando un volumen menor (a igualdad de peso) que las leñas y las astillas, y será por tanto más sencilla su manipulación.

Pélets y briquetas se utilizan como combustible, teniendo como ventaja que pueden ser dosificados mediante sistemas automáticos, por lo que se amplía su posibilidad de utilización en instalaciones de envergadura y en el sector industrial.

2.4.1 Propiedades físicas

2.4.1.1 Forma y tamaño y aspecto (color y brillo)

Los **pélets** pueden tener diferentes formas, aunque su comercialización se realiza casi siempre en forma cilíndrica. Sus diámetros más usuales oscilan entre 0,7 y 2 cm y su longitud de 1 a 7 cm. Su aspecto depende de la materia prima con la que se ha fabricado, variando entre los tonos marrones claros hasta los negruzcos, que se obtienen a partir de diferentes residuos relacionados con la madera, o los verdes fabricados con alfalfa (Figura II-15).

Las **briquetas** se pueden fabricar a partir de muchas clases de biomasa compactada: biomasa forestal, procedente de residuos de fábricas de la madera (fábricas de puertas, de muebles, aserraderos, ect.), biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal, etc.

La mayoría de las briquetas son de forma cilíndrica, aunque también podemos encontrar secciones cuadrangulares, rectangulares, hexagonales, octogonales, etc. Así mismo, pueden ser macizas o huecas. Su diámetro supera los 5 cm, siendo el más habitual el comprendido entre 7,5 cm y 9 cm. La longitud, es variable, oscila entre los 50 y 80 cm y es proporcional al diámetro.



Figura II-15. Pélet de madera (izquierda) y pélet de alfalfa (derecha)

El color de la briqueta, al igual que el de los pélets, variará en función de su composición. Además, si la briqueta está recubierta de parafina en su exterior, presentará un color más claro (blanco-amarillento). El aspecto de briqueta más demandado es aquel que se parece a la madera (Figura II-16).





Figura II-16. Briquetas de madera con distintos tipos de secciones y tamaños y briquetas de paja

2.4.1.2 Densidad

La densidad de los **pélets** dependerá de la materia prima empleada. Por ejemplo, si la materia prima proviene de especies arbóreas de frondosas, en general es más densa que la proveniente de coníferas. Este parámetro también depende de la presión que se ha realizado durante el proceso de fabricación, diseño y manipulación.

Se deben considerar dos valores de la densidad: la densidad real y la densidad aparente.

La densidad real es el cociente entre la masa real y el volumen real de los pélets:

$$d_r = \frac{\text{Masa real}}{\text{Volumen real}}$$

Por otro lado, la densidad aparente es el cociente entre la masa aparente (=masa real) y el volumen aparente (= volumen real + volumen entre los huecos de los pélets):

$$\mathrm{d_a} = \frac{\text{Masa aparente}}{\text{Volumen aparente}} = \frac{\text{Masa real}}{(\text{Volumen real} + \text{huecos})}$$

La densidad aproximada de las **briquetas** se calcula mediante ensayos de laboratorio en los que se mide su masa (en una balanza) y su volumen (mediante cálculos geométricos). Si se precisa de una estimación más exacta se puede emplear también el método denominado de “desplazamiento de agua” que consiste en pesar una determinada cantidad de las briquetas y embutirlos en silicona. Si el peso antes de embutirlas es p y el peso cuando están embutidas en silicona es *t*, el peso de la silicona será *t-p*. A continuación, se introduce en el agua, se mide el volumen de agua desplazada y se calcula la densidad de las briquetas mediante la fórmula:

$$d = \frac{p}{V_{ad} - \frac{t-p}{ds}}$$

donde:
- d densidad de los pélets (o briqueta) en g/cm^3
- p masa de los pélets (o briquetas) en g
- V_{ad} Volumen del agua desplazada en cm^3
- t masa total de la briqueta más la silicona en g
- d_s densidad de la silicona en g/cm^3

Se utiliza este sistema incorporando silicona ya que, de esta forma, el agua no moja la materia prima de naturaleza lignocelulósica que compone la briqueta.

2.4.1.3 Humedad

La humedad del **pélet** dependerá de la forma en la que se ha suministrado el producto. En la fabricación de pélets se suele partir de partículas secas con humedades inferiores al 12%, que se secan aun más en el proceso de peletizado (link al proceso).

En la fabricación de **briquetas** se suelen utilizar partículas secas que posean un porcentaje de humedad inferior al 12%, aunque el proceso de fabricación se consigue disminuir este valor hasta un 8-10%, alcanzando la humedad recomendable. Si la biomasa que forma la briqueta no ha sido bien secada, el agua queda atrapada en su interior y en el proceso de combustión tiende a romper la briqueta al salir en forma de vapor de agua.

Durante los procesos de peletizado y briquetado se produce un calentamiento en la superficie lateral exterior de que provoca un baquelizado, lo que origina una fina película plástica de color más o menos negruzco que impide la entrada de agua en el interior del producto y, por tanto, que aumente la humedad.

2.4.1.4 Friabilidad

Un material es friable cuando se desmenuza con facilidad, por lo tanto, la consideración de esta característica es de gran importancia ya que tanto los pélets

como las briquetas están en constante manipulación y rozamiento entre ellos, sobre todo, en las fases de transporte. Por tanto, a la hora de determinar la calidad de pélets y briquetas, será necesario estudiar la resistencia al golpeteo antes de su combustión, y a la resistencia a desmenuzarse en el hogar donde se van a quemar. Se deberá considerar dos tipos de friabilidad: antes de la combustión y durante la combustión (ver detalles del cálculo de este índice en Camps y Marcos 2008).

2.4.2 Propiedades químicas

2.4.2.1 Composición química

Esta característica condiciona el poder calorífico de pélets y briquetas, por lo que su conocimiento es de vital importancia. Este parámetro va a depender de la materia prima de la que se parta y del empleo de aditivos, por lo que lo ideal será conocer los porcentajes (en peso) de madera, corteza y aditivos, así como de la humedad a la que se manipulan esos productos.

2.4.2.2 Poder calorífico

Se entiende por poder calorífico la cantidad de energía desprendida por cada kg de combustible al ser quemado. Tenemos dos tipos de poder calorífico (superior PCS e inferior PCI) en función de si se considera el agua (condensada) o no (evaporación) en el producto resultante. Estos parámetros se obtienen en laboratorio mediante ensayos en bomba calorimétrica y se miden en kcal/kg o kJ/kg. En ocasiones, y sobre todo cuando se consideran combustibles líquidos, se emplea como parámetro el poder calorífico volumétrico, que se mide en $kcal/dm^3$ o en kcal/l, MJ/dm^3 o en MJ/l.

Este parámetro dependerá de la materia prima empleada en la fabricación de pélets y briquetas. Si éstos proceden de, o se mezclan con residuos sólidos urbanos, su poder calorífico será menor que los provenientes de residuos de corteza y maderas. Así mismo, su cohesión y su calidad también serán inferiores. Altos poderes caloríficos indican buenos combustibles mientras que poderes caloríficos bajos señalan a combustibles más discretos.

Si se desea aumentar el poder calorífico de las briquetas se puede añadir parafina, que posee un poder calorífico superior a la madera y arde bien. Sin embargo, esto encarece el precio de la briqueta.

2.4.3 Propiedades físico-químicas

2.4.3.1 Variables de combustibilidad e inflamabilidad

El punto de inflamabilidad de un combustible es la temperatura más baja a la que puede formarse una mezcla inflamable en contacto con el aire, y la combustibilidad es la facilidad o propensión a arder de un combustible.

Las leñas presentan temperaturas y tiempos de inflamabilidad muy variables, ya que dependen de la existencia de corteza, tipo de corteza y porcentaje, superficie específica de la leña, etc. El tiempo de inflamabilidad de pélets y briquetas es similar o

ligeramente superior al de las leñas, pero la temperatura de inflamabilidad es ligeramente superior en estos, ya que son materiales más densos que la madera, presentan menos contenido de aire en su interior, y el coeficiente de transmisión térmica de estos productos densificados es mayor. Por tanto, pélets y briquetas arden más despacio que la madera, si los comparamos con sección de madera de similar diámetro.

2.4.3.2 Índices de calidad

La combinación de las variables físicas, químicas y físico-químicas nos proporcionarán unos índices orientativos de la calidad de los pélets (ICP) y de las briquetas (ICB), atendiendo a las siguientes fórmulas:

$$ICP = \frac{[K_1 \cdot PCS0 + K_2 \cdot D + K_3 \cdot (1 - M)]}{(Hh \cdot FR)}$$

$$ICB = \frac{[K_1 \cdot PCS0 + K_2 \cdot D + K_4 \cdot TT + K_3 \cdot (1 - M)]}{(Hs \cdot FR)}$$

donde:
ICP Índice de calidad energética del pélet
ICB Índice de calidad energética de las briquetas
K_1 Constante igual a 1/4.500 kg/kcal y 18.810 kg/kJ
PSC0 Poder calorífico superior anhidro en kcal/kg o en kJ/kg
K_2 Constante en dm^3/kg (=1/1,1 dm^3/kg)
D Densidad en kg/dm^3
K_3 Constante adimensional igual a 0,5
M tanto por 1 en material mineral
K_4 Constante en s^{-1} (se puede tomar como valor útil 1/3.600 s^{-1})
TT tiempo total de combustión para briqueta estandarizada (s)
Hh y *Hs* Humedad en base húmeda y seca respectivamente
FR Friabilidad (media entre friabilidad en hogar cerrado y abierto)

Por otro lado, estas calidades se pueden elaborar (u obtener) a partir de tablas basadas en una clasificación por clases. En el caso de los pélets, se utilizan como variables la densidad energética, la humedad y la friabilidad, y en el caso de las briquetas, la densidad, el poder calorífico inferior y la humedad.

Por ejemplo, en la Guía técnica. Instalaciones de biomasa térmica en edificios (IDAE 2009), podemos encontrar un resumen de las principales características de los **pélets de madera** según diferentes normas europeas (DIN y ÖNORM 7135 para pélets, prEN 14961-2).

En el caso de las **briquetas**, sus principales propiedades según IDAE 2009 son:

- **Humedad** < 10%
- **PCI** > 16,9 MJ/kg (4,7 kWh/kg)
- **Densidad** en torno a los 1.000 kg/m^3

- **Contenido en cenizas** < 0,7%

2.4.4 Proceso de densificación

Dentro de los procesos de transformación física de productos (en la gran mayoría de los casos de naturaleza lignocelulósica), destaca la compactación de los mismos para obtener productos combustibles densificados utilizables como sustitutivos energéticos. La compactación de la biomasa se consigue mediante la aplicación de una gran presión (por encima de los 100 bares) con unos rodillos sobre una matriz perforada, a través de la cual se hace pasar el material.

En general, es necesario haber acondicionado previamente los residuos mediante alguna de las etapas de transformación física (astillado, secado, molienda) por lo que el coste final del producto obtenido es superior al del resto de los residuos transformados en combustibles (astillas, serrín, virutas, etc). Las tres actividades más importantes que se han de realizar para obtener briquetas y pélets son:

- Preparación de la materia prima en dimensiones apropiadas
- Secado de la materia prima
- Briquetado o peletizado de la materia prima

La Figura II-17 representa la línea de flujo para obtener pélets y briquetas. Aunque la máquina es distinta, el proceso de obtención es similar.

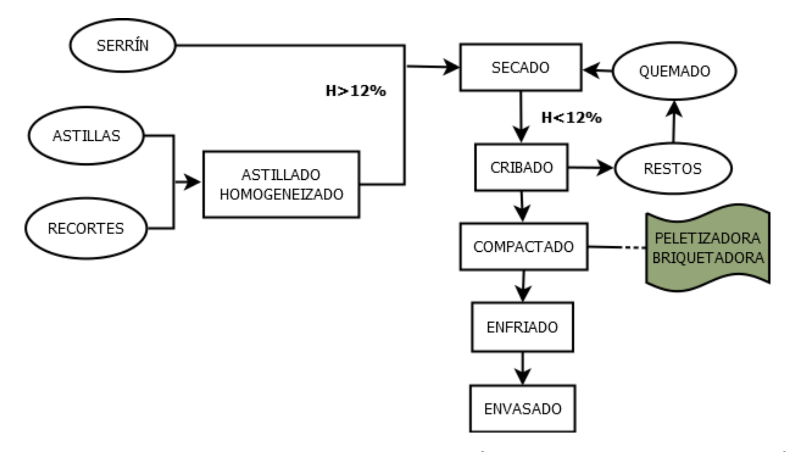


Figura II-17. Línea de flujo de pélets y briquetas (Fuente: Camps y Marcos 2008)

2.4.4.1 Etapas de transformación de biomasa residual

Las principales etapas de transformación de la biomasa residual que han de realizarse para obtener pélets y briquetas son: el astillado, secado, molienda, tamizado y densificado (peletizado y briquetado).

2.4.4.1.1 Reducción granulométrica: Astillado

Este conjunto de operaciones es imprescindible cuando se pretende utilizar el material residual (lignocelulósico forestal), tanto en aplicaciones directas como para la fabricación de elementos densificados. La primera reducción granulométrica se consigue con el **astillado,** que permite obtener astillas (chips) con un tamaño máximo de partícula que posibilita el manejo, almacenaje, carga y transporte de los residuos. En general, se puede hablar de 3 tipos de equipos de astillado:

- **Astilladoras móviles:** Arrastradas mediante tractores forestales y accionadas desde la toma de fuerza de éstos. Son capaces de llegar a lugares de difícil acceso, pero los rendimientos suelen ser bajos (Figura II-18a).
- **Astilladoras autopropulsadas:** Poseen su propio sistema de tracción. Pueden desplazarse de forma más rápida.
- **Astilladoras fijas o semifijas:** Se utilizan en lugares donde la envergadura de la explotación y los elevados volúmenes manejados, hacen amortizable este tipo de instalaciones (Figura II-18b).



Figura II-18. a) Astilladora móvil y b) Astilladora semi-fija (Fuente: http://www.interempresas.net y http://www.masias.com)

2.4.4.1.2 Secado

Normalmente la biomasa residual presenta un elevado contenido en humedad (sobre el 100% en base seca), por lo que requiere de un acondicionamiento previo para su posterior utilización con fines energéticos. Tenemos dos tipos de secado:

- **Secado natural:** se basa en aprovechar las condiciones ambientales para facilitar la deshidratación de los residuos.
- **Secado forzado:** se realiza cuando la humedad conseguida con el secado natural no es la adecuada para el procesamiento del material, o bien no se disponen de las condiciones necesarias para su realización. En este caso, los equipos más utilizados se clasifican en secaderos directos (transferencia de calor por contacto directo entre el material húmedo y los gases calientes) y secaderos indirectos (transferencia de calor realizada a través de una pared de retención).

2.4.4.1.3 Molienda y Tamizado

Posteriormente es necesario realizar además una **molienda** del material para conseguir una mayor homogeneidad y menor tamaño de partícula. Generalmente, para las aplicaciones de densificación se suelen emplear molinos de martillos debido principalmente a su menor mantenimiento, comparado con los equipos de cuchillas.

En este punto, se eliminan los materiales indeseables como elementos metálicos, piedras, arena, piezas de gran tamaño, etc., ya que pueden provocar graves problemas en las instalaciones de molienda. Las piezas de gran calibre y las piedras se eliminan al principio del diagrama de flujo mediante cribas vibrantes o zarandas inclinadas. La arena y gravilla fina se eliminan mediante **tamizado**, y son los elementos metálicos los que presentan los mayores problemas, ya que ocasionan roturas en los martillos y mallas de los equipos de molienda y, además, al producirse chispas por la fricción entre metales chocando a gran velocidad, existe el peligro de ignición del producto molido. Para su eliminación se emplean imanes permanentes y electroimanes, y también se recurre a la presencia de detectores de metales que detienen el funcionamiento de la instalación cada vez que se detecta la presencia de metales en el flujo de material.

2.4.4.2 Peletizado y Briquetado

2.4.4.2.1 Peletizado

El proceso de peletización consiste en la compactación de material lignocelulósico en determinadas condiciones (granulometría inferior a 2 cm y humedad por debajo del 12% en base seca) para obtener cilindros de un diámetro entre 7 y 25 mm. La longitud del pélet, como ya se ha indicado, es variable, aunque los más abundantes oscilan entre los 3,5 y 6,5 cm.

Para su producción es necesario disponer de un producto base con una humedad comprendida entre 8-15% (preferiblemente <12%), y un tamaño de partícula del orden de 5 mm. La compactación de la biomasa debe ser de 1 a 6 veces su volumen y los agujeros de extrusión de la matriz deben tener forma cilíndrica, con diámetros comprendidos entre 0,5 y 2,5 cm y de 1 a 3 cm de longitud. La densidad de los pélets suele estar comprendida entre los 1.000-1.200 kg/m^3, si bien, cuando se distribuye a granel, la densidad aparente suele ser del orden de 800 kg/m^3. Las tecnologías de fabricación más utilizadas se realizan mediante las siguientes máquinas:

- **Peletizadora de matriz anular**

La forma de la matriz en este equipo tiene forma de anillo. Dentro de este tipo de prensa existen dos variantes: (i) matriz anular fija y rodillos (llamados discos) giratorios que empujan la materia a través de numerosas hileras; (ii) matriz que gira a gran velocidad y rodillos fijos.




Figura II-19. Peletizadora de matriz anular y matriz anular (Fuente: http://www.biodiesel-machine.com)

- **Peletizadora de matriz plana**

En este caso la matriz es fija y tiene forma de un disco horizontal. Los rodillos recorren la cara superior.




Figura II-20. Peletizadora de matriz plana y matriz plana (Fuente: http://www.biodiesel-machine.com)

2.4.4.2.2 Briquetado

Como ya se ha comentado anteriormente las briquetas están formadas por materiales prensados que se utilizan como combustible. Cuando se emplean para su fabricación elementos lignocelulósicos, como la madera, las temperaturas originadas durante la fase de prensado producen un reblandecimiento de la lignina, de manera que tras su enfriamiento funciona como aglomerante de las partículas. La fabricación de briquetas es muy similar a la de pélets, aunque el producto resultante tenga dimensiones mayores: diámetro > 5 cm y longitud entre 50 y 80 cm. Existen diferentes tecnologías de briquetado, pero las más utilizadas son las tres siguientes:

- ***Densificación por impacto. Briquetadoras de pistón***

La compactación del material se realiza mediante el golpeteo de un pistón (accionado a través de un volante de inercia) sobre la biomasa. Con esta metodología se obtienen densidades entre 1.000 y 1.200 Kg/m^3.

- ***Densificación por extrusión. Briquetado de tornillo***

Se trata de un sistema basado en la presión ejercida por un tornillo sinfín, que hace avanzar el material hasta una cámara que se estrecha progresivamente (forma cónica). Este tipo de equipos permite realizar briquetas con orificios interiores (huecas) lo que favorece la combustión. Además, se obtienen briquetas de mayor densidad que las obtenidas mediante sistemas de impacto (1.300-1.400 kg/m^3), si bien, los consumos energéticos y los costes de mantenimiento son notablemente más elevados.



Figura II-21. Briquetadora de pistón (izquierda) y briquetadora de extrusión (Fuente: http://www.biodiesel-machine.com y http://www.lippel.com.br)

- ***Briquetadoras hidráulicas o neumáticas***

En estas máquinas, la presión se produce mediante uno o varios cilindros accionados por sistemas hidráulicos o neumáticos. Se suelen utilizar cuando los residuos son de muy mala calidad, o están húmedos y no se requiere una gran calidad de briqueta final. Son equipos de bajo consumo y mantenimiento. Producen briquetas con densidades del orden de 700-800 kg/m^3, aunque pueden alcanzar en determinados casos 900-1.000 kg/m^3).



Figura II-22. Briquetadora hidráulica (Fuente: http://www.lippel.com.br)

2.4.4.3 Uso de Aditivos

En general no se utilizan aditivos en el proceso de obtención de pélets y briquetas. Aunque los aditivos pueden favorecer el proceso proporcionando mayor cohesión al producto final, mejorando así su resistencia al golpeteo, su uso encarece el proceso y

pueden resultar contaminantes. Este último aspecto resulta problemático si los pélets se utilizan en chimeneas domésticas donde la combustión ha de ser limpia.

Por tanto, en el proceso de peletización generalmente no se utilizan productos químicos sino simplemente presión y vapor, aunque es posible encontrar también un porcentaje reducido de aditivos biológicos. En el caso de las briquetas, la acción aglomerante que proporciona la lignina permite no agregar ningún tipo de aditivo (resinas o ceras).

2.5 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Camps M, Marcos F. 2008. Los biocombustibles. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 384 pp. ISBN 978-84-8476-360-4

CIEMAT. 1995. La biomasa: fuente de energía y productos para la agricultura y la industria. Ed. CIEMAT. Madrid, España.

EIA. 2009. Manual del carbón activo. Ed. Escuela Internacional de Ingeniería del Agua de Andalucía. Máster en Ingeniería del Agua. Universidad de Sevilla. Sevilla. 89 pp.

Estudio FAO 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO: Montes 41. Depósito de documentos de la FAO. Roma, Italia. ISBN 92-5-301328-1

EVE. 2001. Valorización de la biomasa en el País Vasco. Ed. Ente Vasco de la Energía (EVE). Bilbao, España. 89 pp.

IDAE. 2009. Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 88 pp.

Rincón S, Gómez A, Klose W. 2011. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Gasificación de carbonizados. Kassel University Press, Germany. 132 pp. ISBN 978-3-89958-951-7.

3 BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Se denominan **biocombustibles líquidos** a todos aquellos combustibles que se obtienen a partir de la biomasa y que pueden ser utilizados para cualquier aplicación energética, ya sea térmica, eléctrica o mecánica, y para alimentar calderas y motores de combustión interna (Otto y diesel). Este tipo de combustibles alternativos engloban a los denominados **biocarburantes**, que son biocombustibles líquidos (y también gaseosos) empleados para el transporte, y los **biolíquidos,** que hacen referencia a los biocombustibles líquidos destinados a usos energéticos distintos del transporte, incluidas la electricidad y la producción de calor y frío.

Los biocombustibles líquidos más relevantes en España, y por tanto, más desarrollados en la actualidad son el **biodiesel** y el **bioetanol**. El primero es un combustible producido a partir de aceites vegetales, grasas animales, aceites de fritura usados y aceites provenientes de microalgas, aunque son las semillas de colza, girasol y soja las materias primas más utilizadas para este fin. Además, cabe destacar que se están realizando estudios para la producción de biodiesel a partir de la esterificación de bioetanol y biometanol. Sus propiedades son básicamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano, presentando además un punto de inflamación superior. Por todo ello puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si éstos están adaptados convenientemente.



El alcohol etílico, o etanol, es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azucares que se encuentran en productos vegetales tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, etc. Estos azúcares se presentan combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. El etanol se utiliza en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 % (E5) o el 10% (E10), que no requieren modificaciones en los motores actuales, o en mezclas del 85% (E85) y del 95% (E95) utilizadas para vehículos con motores especiales. En este punto señalar que en algunos países como EEUU, Brasil o Suecia, se comercializan los vehículos llamados FFV (*Fuel*

Flexible Vehicles), con motores adaptados que permiten una gran variedad de mezclas, desde el uso del 100% de gasolina hasta un 100% de bioetanol (E100).

Otros carburantes bioalcohólicos de menor importancia son el **biometanol**, obtenido de la madera y de la paja, los aditivos de la gasolina (**ETBE**) y del gasóleo (**MTBE**), así como el **butanol**, obtenido a partir de la avena, de la remolacha y de la caña de azúcar. El ETBE es un aditivo sintetizado que se incorpora a las gasolinas para aumentar el índice de octanos. Este compuesto sustituye al MTBE de origen fósil. Para fabricar ETBE el etanol se mezcla con un subproducto obtenido en las refinerías llamado isobutileno. Su uso, presenta como ventajas una menor volatilidad y solubilidad, además de una mayor eficiencia térmica. Además, también es menos corrosivo. Su desventaja radica en la disponibilidad del isobutileno y la exigencia de un proceso industrial añadido.

3.2 BIODIESEL

El biodiesel es un biocarburantes que se obtiene básicamente a partir de semillas de plantas oleaginosas. También puede obtenerse de los aceites de fritura usados y de las grasas animales, con los controles de calidad pertinentes. En términos cuantitativos, se estima que en el año 2009 se emplearon en el mundo 13,9 millones de toneladas de aceites vegetales (5,4 Mt de soja; 5,1 Mt de colza; 2,7 Mt de palma y 0,45 Mt de girasol y otros en menor cantidad), y 1,6 millones de toneladas de otras materias grasas provenientes de animales o de aceites vegetales usados (PER 2011-2020).

En términos de producción (y de consumo), la Unión Europea lidera a nivel mundial con casi 9 Mt, seguida por EEUU con algo más de 1 Mt y Brasil y Argentina con unos 2 Mt cada una. Dentro de la Unión Europea, España sólo se encuentra por detrás de Alemania y Francia con una producción de 1 Mt de biodiesel según datos del año 2010 (PER 2011-2020).

Sus características son parecidas a las del gasóleo convencional, por lo que se puede emplear como combustible puro, o mezclado con gasóleo en diferentes proporciones (Figura II-23) en motores diesel convencionales sin la necesidad de introducir modificaciones en su diseño básico. En España, como en el resto de la Unión Europea, la legislación estipula que cuando el porcentaje de biodiesel presente en el gasóleo de automoción supere el 5% en volumen, ha de etiquetarse obligatoriamente en las estaciones de servicio con una denominación específica. A partir de este porcentaje de mezcla, se aconseja reemplazar los conductos de goma del circuito del combustible por otros elastómeros de síntesis como el vitón. Por otro lado, y atendiendo a la inflamabilidad y toxicidad, este combustible es más seguro que el gasoil proveniente del petróleo, ya que no es peligroso para el medioambiente y es biodegradable.

Con la actual tecnología de motores, es el biocarburante de mayor futuro en Europa y España por la gran demanda de gasóleo en nuestros mercados, consecuencia del gran aumento del número de vehículos con motores diesel y del transporte de mercancías.



Figura II-23. Surtidor de Biodiesel y autobuses urbanos de Zaragoza

3.2.1 Fabricación del biodiesel

El biodiesel es un carburante compuesto por esteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga obtenidos, como ya se ha dicho, de aceites vegetales o grasas animales, y que se caracteriza por su elevada densidad energética (37 MJ/kg). Los aceites naturales vegetales no se pueden utilizar en los motores diesel convencionales sin realizar modificaciones. Para conseguir el biodiesel a partir de aceites naturales se suele realizar un proceso de transesterificación, mediante el cual se transforman las propiedades del aceite original en otras similares a las del gasóleo, para un uso adecuado como combustible.

A continuación, se muestra un esquema general del proceso de producción de biodiesel a partir de semillas de una especie oleaginosa (aceite vegetal) o de los aceites vegetales usados (AVU) y grasas animales (Figura II-24).

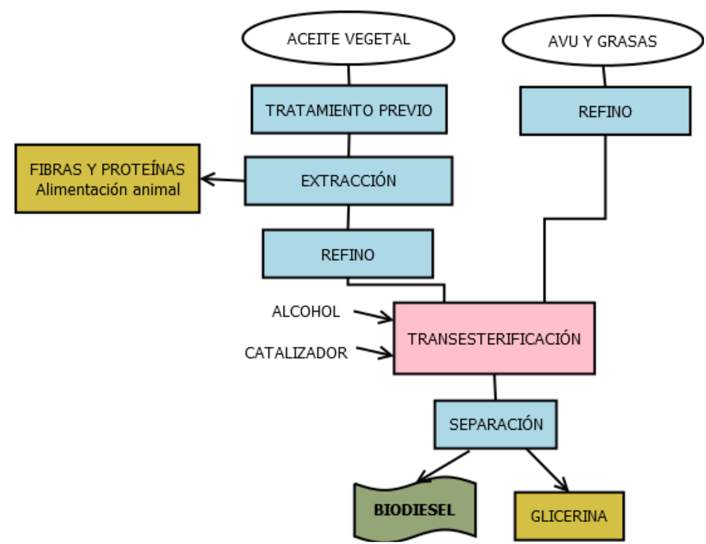


Figura II-24. Diagrama del proceso de producción de biodiesel (Fuente: Modificado de European Biofuels Technology Platform 2008)

3.2.1.1 Preparación de las semillas antes de la extracción

3.2.1.1.1 Limpieza

Las semillas, al llegar a la industria, pueden contener elementos no deseados tales como tierra, barro, piedras, partículas metálicas u otros (cuerdas, trapos, etc.). Todos estos elementos deben ser separados antes de que la semilla pase a ser procesada, ya que su existencia puede originar daños en el proceso de extracción.

3.2.1.1.2 Secado

Esta tarea es importante para la correcta conservación de la semilla durante el almacenamiento y para que se realicen de manera óptima las operaciones posteriores a la extracción. En la mayor parte de los casos, se admite una humedad máxima del 8%.

3.2.1.1.3 Descascarillado

Las semillas de pequeño tamaño, así como la linaza, colza, sésamo, etc. se manipulan sin descascarillar, ya que es una operación difícil y costosa. Cuando se trabaja con semillas de mayor tamaño, habrá que determinar un nivel de descascarillado óptimo, que será aquel en el que se valore la menor pérdida de aceite, ya sea en la porción de película que se adhiere a la cáscara, o el absorbido en la propia cáscara si la dejamos sin eliminar.

3.2.1.1.4 Molienda o molturación

Se ha demostrado que la extracción de aceite de una semilla oleaginosa, bien sea por métodos mecánicos o por métodos químicos, se realiza más rápidamente cuando la semilla se ha sometido previamente a una trituración o a una laminación. En el caso de las extracciones químicas, la trituración aumenta la superficie de contacto entre, por ejemplo, el hexano y la materia prima, por lo que circula mucho mejor por el lecho de extracción.

3.2.1.1.5 Acondicionamiento

El acondicionamiento se refiere al índice de humedad y a la temperatura que debe tener una semilla para conseguir una mayor eficiencia durante el proceso de extracción. Se ha determinado que una semilla oleaginosa que posee un bajo contenido en humedad (1-2%) libera aceite con mayor dificultad que cuando tiene cantidades de agua superiores (ej. 10%).

Por otro lado, los tratamientoS térmicos, además de regular la humedad de los granos, incrementan su plasticidad, aumentan la fluidez del aceite, coagulan las fracciones proteicas, inactivan las enzimas y destruyen los microorganismos patógenos.

3.2.1.2 Extracción

El proceso de extracción puede realizarse de forma mecánica, mediante disolventes químicos o mediante la combinación de ambas.

3.2.1.2.1 Extracción mecánica

La extracción mecánica se realiza generalmente a través de una prensa de expulsor también denominada de tornillo o extrusor (Figura II-25). Esta prensa es un extractor mecánico continuo, donde se extrae el aceite de la materia prima en un solo paso, con una elevada presión.

Generalmente una prensa de tornillo consiste en una rosca helicoidal continua a la que se hace girar de forma concéntrica dentro de un cilindro estático perforado (denominado barril o jaula). El material se transporta a lo largo de la longitud del barril, y gracias al incremento de la presión, el aceite es expulsado y drenado a través de unos pequeños espacios o surcos que existen en el barril.

El material comprimido, o torta proteínica, se descarga en un extremo del barril y el aceite y algunos sólidos se recogen en la base de la prensa para una posterior clarificación, que se realizará o por filtrado o por decantación. Los rendimientos obtenidos con este tipo de extracción pueden llegar a ser superiores al 30%.



Figura II-25. Tornillos y barril utilizados en la cooperativa ACOR para la extracción de aceite de semillas de girasol y colza (Fuente: Oriol Cos)

3.2.1.2.2 Extracción química

La extracción del aceite se realiza con la ayuda de disolventes orgánicos: hexano, propano, fluidos supercríticos, etc. que tienen la capacidad de disolver las sustancias grasas. Este tipo de extracciones se realizan a temperaturas de unos 50ºC con una relación 18:1 de disolvente respecto a la cantidad de semilla. Los rendimientos finales de la extracción química son del orden del 40% en peso.

3.2.1.2.3 Extracción mixta

Se obtiene mediante la combinación de las dos anteriores. Primero se realiza una extracción mecánica parcial que deja en la matriz un residuo de aceite de algo más del 20% en peso, y después se realiza una extracción química que aumenta el rendimiento hasta casi un 42% en peso.

Los subproductos de esta fase de la cadena de producción son el "*expeller*" en el caso de la extracción mecánica, las harinas en el caso de la extracción química y la harina desaceitada en el caso de la extracción mixta. Debido a sus altos contenidos de proteínas, carbohidratos y fibras, estos subproductos son usados, sobre todo, en la alimentación de animales, aunque la parte proteica del residuo puede valorizarse para la producción de energía térmica mediante combustión directa, con un PCI de casi 21 MJ/kg.

3.2.1.2.4 Otros tipos de extracciones

Se han desarrollado otro tipo de metodologías de extracción como alternativa a las anteriores con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos ya sea para, disminuir sus costes, hacerlos más amigables, o disminuir la toxicidad de los solventes utilizados tradicionalmente. Entre los diferentes metodologías estudiadas (utilizadas, por ejemplo, en la extracción de lípidos de microalgas) caben destacar: (i) la exposición de las microalgas a ondas acústicas a baja frecuencia (**ultrasonido**) para la destrucción de la pared celular; (ii) extracción con fluidos **supercríticos** (SFE); extracción asistida por **microondas** que aprovecha la polaridad de las moléculas que componen las estructuras de los lípidos y proteínas; (iii) **autoclavado** que permite trabajar con la biomasa húmeda; (iv) **shock osmótico** o (v) **extracciones enzimáticas**.

3.2.1.3 Refino

Esta fase se realiza para mejorar la calidad de los aceites brutos (vegetales) antes de someterlos al proceso de transesterificación para obtener biodiesel. Primero, se realiza un centrifugado donde se separa el aceite de los residuos sólidos. Después, se desgoman con agua o ácido, eliminando los pigmentos las ceras y los fosfatados. Por último, se realiza una neutralización física a través de temperaturas altas (240-260ºC) y baja presión. También puede realizarse mediante procesos químicos, por ejemplo, una saponificación con hidróxido de sodio. De esta forma se reduce la acidez de los aceites.

Cuando la materia prima proviene de aceites y grasas usadas, las altas temperaturas (>150ºC) deterioran los triglicéridos que van escindiéndose progresivamente en monoglicéridos y diglicéridos de ácidos grasos y ácidos grasos libres, con el consiguiente incremento de acidez. Los aceites y grasas usados pueden alcanzar valores de acidez variable entre 2 y 15%, pero la acidez óptima para que un aceite sea transformado en biodiesel no puede superar un 4%. Para reducir la acidez de estos aceites se utilizan las siguientes técnicas:

3.2.1.3.1 Saponificación con hidróxido de sodio

Se utiliza esta técnica cuando la acidez del aceite usado es inferior o igual al 10%. El proceso requiere temperaturas de entre 60 y 80ºC y posteriormente se realiza una centrifugación que separará los jabones. Por último se lleva a cabo la fase de desgomado, a través de agua o ácido.

3.2.1.3.2 Esterificación de los ácidos grasos

Si contamos con valores de acidez entre un 10% y un 15%, los ácidos grasos libres se convierten en éster metílico por medio de una reacción que se realiza a elevadas temperaturas (250-260ºC), altas presiones (0,5-0,6 MPa) y con catalizadores ácidos (ácido sulfúrico o fosfórico).

3.2.1.4 Transesterificación

Aunque podría obtenerse biodiesel a través de procesos como la pirólisis, las micro emulsiones o la esterificación, el método utilizado comercialmente es el de transesterificación o alcohólisis. La transesterificación se clasifica en dos tendencias: la transesterificación catalítica y la no-catalítica que, a su vez, constan de diferentes variantes como se muestra en la Figura II-26:

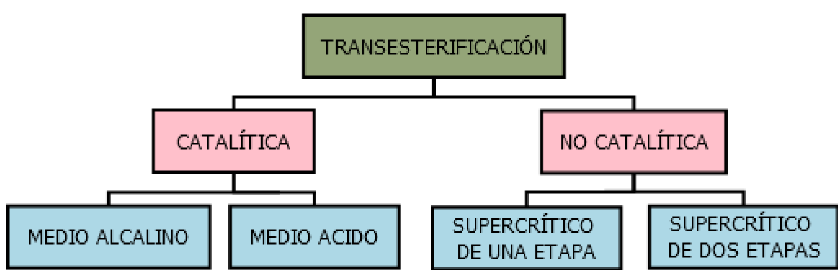


Figura II-26. Diferentes variantes de transesterificación

En la actualidad, la variante más utilizada es la reacción catalítica en medio básico por sus altos rendimientos y por poseer unas condiciones operativas moderadas de presión y temperatura. Por tanto, y en líneas generales, se puede describir el proceso de transesterificación como la reacción química en la que el glicerol contenido en los aceites es sustituido por un alcohol ante la presencia de un catalizador.

El alcohol más utilizado en la producción de biodiesel es el metanol, aunque también se emplean el etanol, el alcohol isopropílico y el butanol. La elección de un tipo u otro va a depender de factores tales como su contenido en agua, su precio, la cantidad de alcohol necesario para la reacción, la posibilidad de recuperación y reciclaje, su régimen de tasación y cuestiones ambientales relacionadas con las emisiones a la atmósfera.

En cuanto a los catalizadores, estos pueden ser de varios tipos:

- Ácidos homogéneos: H_2SO_4, HCl, H_3PO_4, RSO_3
- Ácidos heterogéneos: Zeolitas, Resinas Sulfónicas, SO_4/ZrO_2, WO_3/ZrO_2
- Básicos heterogéneos: MgO, CaO, $Na/NaOH/Al_2O_3$
- Básicos homogéneos: KOH, NaOH
- Enzimáticos: Lipasas (Candida, Penicillium, Pseudomonas)

Los catalizadores homogéneos básicos que suelen utilizarse a escala comercial son la sosa caústica (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH). La ventaja del hidróxido de potasio es que la glicerina resultante del proceso es mucho menos tóxica que si se utiliza NaOH. A su vez, el KOH se disuelve mejor en metanol. Por el contrario, la ventaja de la sosa es su bajo precio y su fácil obtención y manipulación. Para ambos productos químicos se requiere un mínimo de pureza, que debería ser de al menos un 96% para la sosa caústica, y por encima del 85% para el hidróxido de potasio.

Los catalizadores ácidos resultan demasiado lentos en los procesos industriales de producción de biodiesel, utilizándose sobre todo para procesos de esterificación de los ácidos grasos libres. Por otro lado, los catalizadores enzimáticos todavía no representan una alternativa eficiente a los que se utilizan actualmente, ya que el precio de las enzimas es caro, la velocidad de reacción es bastante lenta, y posee menores rendimientos que los obtenidos con los catalizadores homogéneos básicos.

La reacción química de transesterificación consiste en tres reacciones reversibles en las que un triglicérido se convierte consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina, liberándose en cada una de ellas un mol de éster metílico (Figura II-27). Estequiométricamente se requieren tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido, pero en la práctica se emplea un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia una mayor formación de éster.

$$\begin{matrix} R_1CO\text{-}O\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}O\text{-}COR_2 \\ R_3CO\text{-}O\text{-}H_2C \end{matrix} + CH_3OH \longrightarrow CH_3\text{-}O\text{-}COR_1 + \begin{matrix} HO\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}O\text{-}COR_2 \\ R_3CO\text{-}O\text{-}H_2C \end{matrix}$$

Triglicérido | Metanol | Metiléster | Diglicérido

$$\begin{matrix} HO\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}O\text{-}COR_2 \\ R_3CO\text{-}O\text{-}H_2C \end{matrix} + CH_3OH \longrightarrow CH_3\text{-}O\text{-}COR_3 + \begin{matrix} HO\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}O\text{-}COR_2 \\ HO\text{-}H_2C \end{matrix}$$

Diglicérido | Metanol | Metiléster | Monoglicérido

$$\begin{matrix} HO\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}O\text{-}COR_2 \\ HO\text{-}H_2C \end{matrix} + CH_3OH \longrightarrow CH_3\text{-}O\text{-}COR_2 + \begin{matrix} HO\text{-}H_2C \\ \quad CH\text{-}OH \\ HO\text{-}H_2C \end{matrix}$$

Monoglicérido | Metanol | Metiléster | Glicerina

Figura II-27. Reacciones químicas implicadas en la transesterificación (Fuente: elaboración propia)

Durante este proceso hay que tener cuidado de que no se produzcan reacciones secundarias tales como la saponificación y la neutralización de ácidos grasos libres que reducirían el rendimiento del proceso dando lugar a jabones. Para ello, debe contarse

con glicéridos y alcoholes anhidros (evaporando el exceso de humedad de los aceites antes de incluirlos en el proceso) y con bajas proporciones de ácidos grasos libres.

Existen numerosas tecnologías, y combinaciones de éstas, para la obtención de biodiesel. La elección de una tecnología u otra dependerá, sobre todo, de la capacidad de producción de la planta, siendo los procesos continuos más idóneos para las plantas de mayor capacidad y con una alimentación más uniforme del proceso, y los procesos discontinuos (o *Batch*) indicados para plantas de menor capacidad y diferente calidad de alimentación.

3.2.1.4.1 Proceso discontinuo

Es el método más sencillo para obtener biodiesel obteniéndose proporciones de alcohol:triglicérido de 4:1. Las condiciones básicas de la reacción cuentan con temperaturas que oscilan entre 25ºC a 85ºC (habitualmente unos 65ºC) y NaOH como catalizador más común (aunque también se utiliza KOH) en rangos que oscilan entre un 0,3% y un 1,5%. Esta reacción ha de realizarse con una agitación rápida para que se produzca una correcta mezcla del aceite, el catalizador y el alcohol en el reactor. Cuando la reacción está llegando a su fin, la velocidad de agitación disminuye para permitir la separación entre el glicerol y la fase éster. Con este método se pueden obtener rendimientos de entre un 85% y un 94% en un tiempo de entre 20 minutos y una hora (Figura II-28).

Algunas plantas, realizan una pequeña modificación sobre este proceso llevando a cabo reacciones en dos etapas, eliminando el glicerol entre ambas. Esto aumenta el rendimiento final hasta porcentajes superiores al 95%.

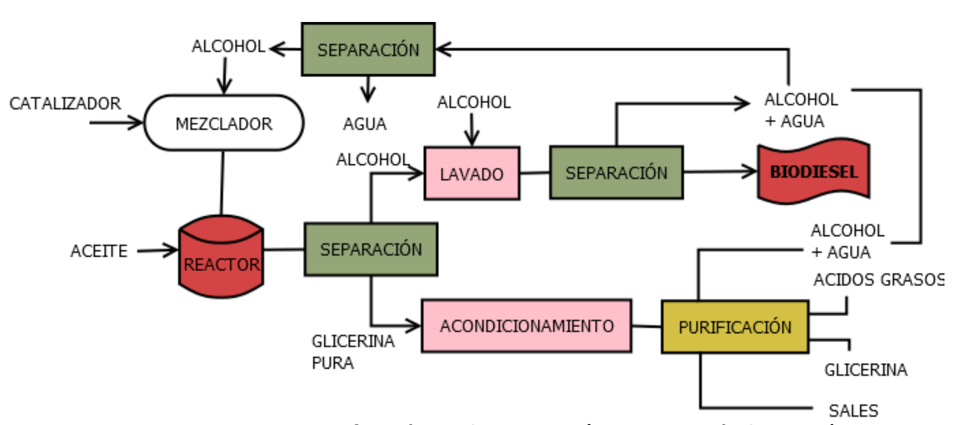


Figura II-28. Transesterificación en discontinuo (Fuente: Fernández 2010)

3.2.1.4.2 Proceso continuo

Este proceso es una modificación del anterior y en él se utilizan varios reactivos continuos de tanque agitado seguidos de sendos tanques de sedimentación, buscando

un aumento del rendimiento de la reacción. Por tanto, y como aparece reflejado en la Figura II-29, después de que el glicerol se ha decantado en una primera reacción, se vuelve a realizar una segunda reacción que será mucho más rápida. Aunque para lograr este proceso se requiere más tiempo, se puede alcanzar hasta un 98% de producto de reacción.

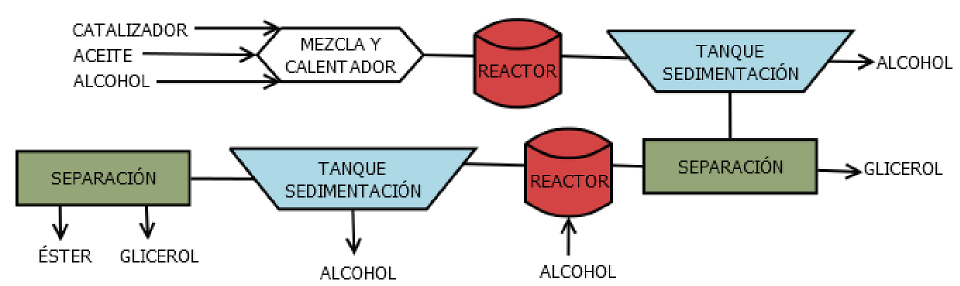


Figura II-29. Proceso general de transesterificación continuo (Fuente: Modificado de Fernández 2010)

3.2.1.4.3 Proceso con temperatura y presión elevadas

Este proceso es el más eficaz pero el más caro, por lo que sólo se utiliza para producciones industriales de volúmenes muy grandes (>25.000 t/año). Consiste en una reacción en continuo con temperaturas que alcanzan los 220ºC y presiones de hasta 50 MPa. Como catalizador se utiliza el ácido fosfórico y se obtienen acideces de los aceites más bajos (<4%). Después de producirse la transesterificación, se realiza un tratamiento del exceso de la reacción y del glicerol mediante una refinación químico-física, una purificación por destilación en vacío, y un blanqueo con carbones activos.

3.2.2 Características físico-químicas del biodiesel

En la siguiente tabla se observan las características físico-químicas del biodiesel, que en general son muy parecidas a las del gasoil, por lo que fácilmente puede sustituirlo.

Tabla II-2. Principales características físico-químicas del biodiesel, aceites vegetales y del gasoil (Fuente: Agencia Andaluza de la Energía 2011)

PROPIEDAD	GASOLEO	ACEITES VEGETALES	BIODIESEL
Densidad a 20ºC (kg/m^3)	840	910/930	870/890
Viscosidad a 40ºC (Cst)	3/4,5	25/35	3,5/4,5
PCI (MJ/kg)	43	35/38	36/39
Nº Cetano	48/51	30/40	49/54
POFF (ºC)	-20	10/20	0/-7
Residuo carbonoso (%)	0,1	>10	0,25/0,42
Punto de inflamación (ºC)	65	>200	120/170
Azufre (% en peso)	0,05	0	0

PCI: Poder calorífico inferior; POFF: Punto de obstrucción del filtro frío

Algunas de estas características convierten al biodiesel en un combustible más eficiente que el gasoil: el alto nº de cetano (índice que indica la eficiencia de la

reacción que se lleva a cabo en los motores diesel de combustión interna) garantiza un arranque rápido del motor. Por otro lado, su elevado punto de inflamación conlleva más seguridad en su manipulación y la ausencia de azufre disminuye su poder contaminante. Sin embargo, otras características evidencian su peor comportamiento frente al gasoil: su PCI es algo inferior al del gasoil, su POFF, aunque depende de la materia prima utilizada, suele ser superior o muy superior al del gasoil, lo que es insuficiente para invierno.

3.2.3 Ventajas e inconvenientes del uso de biodiesel

El biodiesel es un combustible ecológico que posee grandes ventajas, sobre todo, medioambientales:

- **No contamina y es biodegradable:** El biodiesel es un éster metílico generado a partir de aceites vegetales, algas o aceites de origen animal. No es contaminante ya que el CO_2 que se produce en su combustión, es el mismo que el que absorbieron las plantas o las algas de las que proviene durante su crecimiento. Además, el biodiesel es biodegradable por lo que en caso de derrame y/o accidente no pone en peligro el suelo ni las aguas subterráneas.
- **Se produce a partir de materias primas renovables:** aceites vegetales, vírgenes y reciclados.
- **No contiene prácticamente azufre:** Al contrario que en el gasóleo, el biodiesel no contiene azufre, por lo que evita las emisiones de SOx a la atmósfera (lluvia ácida o efecto invernadero).
- **No es tóxico:** Al tratarse de un combustible vegetal, y a diferencia de los hidrocarburos, el biodiesel no contiene sustancias perjudiciales para la salud, como bencenos ni sustancias aromáticas cancerígenas, disminuyendo así el riesgo de enfermedades respiratorias y alérgicas.
- **Mejora la combustión:** lo que conlleva una reducción de inquemados, y por tanto, de las emisiones de hollín y de monóxido de carbono.
- **No es una mercancía peligrosa:** El punto de inflamación del biodiesel se encuentra por encima de 120ºC por lo que se clasifica como mercancía peligrosa. Por tanto, su almacenamiento, transporte y manipulación son seguros.
- **Alarga la vida de los motores de los vehículos:** Su alto poder lubricante protege el motor de los vehículos reduciendo su desgaste, reduciendo el ruido que generan, así como los gastos de mantenimiento.

Pero también posee una serie de desventajas:

- **Costos más elevados que los del gasóleo:** éstos dependerán de la fuente de aceite utilizada en su elaboración.
- **Solidificación:** a bajas temperaturas el biodiesel puede formar cristales que pueden obstruir los conductos del combustible.

- **Degrada ciertos materiales:** debido a sus propiedades solventes, el biodiesel puede ablandar y degradar materiales como el caucho natural y la espuma de poliuretano, por lo que es necesario antes de su utilización, realizar una serie de modificaciones de determinados componentes del motor, especialmente en vehículos viejos.
- **Contiene un 10% más de óxidos nitrosos que el gasoil mineral:** Aunque el biodiesel es menos contaminante al realizar un balance general de gases de escape (SOx y NOx), el contenido de óxidos nitrosos es levemente superior al del gasoil. Estos compuestos también son precursores de la lluvia ácida.
- **Problemas de estabilidad:** Posee una menor estabilidad a la oxidación que el diesel debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiesel. La utilización de recipientes que contengan cobre, cinc o plomo puede afectar de manera muy negativa a la estabilidad del biodiesel, ya que forman gran cantidad de sedimentos.

3.3 BIOETANOL

El bioetanol es un biocarburantes que se obtiene mediante la fermentación de especies ricas en azúcares o almidón, por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada, etc.), la remolacha azucarera, la caña de azúcar, el sorgo, la patata u otros cultivos energéticos, así como de los excedentes de alcoholes vínicos (ver Temas 3 y 4 del Bloque I de este documento para más detalles sobre potenciales materias primas). Por ejemplo, en EEUU la mayor parte del bioetanol se obtiene a partir de la hidrólisis del maíz, en Brasil a partir de la caña de azúcar, en la Unión Europea se utilizan los cereales y la remolacha azucarera, y en China el maíz y la yuca.

Según datos publicados en el PER 2011-2020, EEUU lidera la producción a escala mundial con $49{,}1 \cdot 10^6$ m^3 seguido por Brasil con más de la mitad ($26{,}2 \cdot 10^6$ m^3). A mucha más distancia, les sigue la Unión Europea (especialmente Francia y Alemania) con $4{,}5 \cdot 10^6$ m^3 y China con $2{,}1 \cdot 10^6$ m^3, que han apostado por el aumento de producción basado en el desarrollo del mercado de mezclas directas. España, por detrás de Francia y Alemania, produce unos 580.000 m^3 de bioetanol.

En principio, el bioetanol se puede utilizar mezclado con la gasolina convencional, normalmente al 5%, en los motores de los vehículos sin necesidad de modificarlos. Para utilizarlo en proporciones mayores, es necesario que los motores estén preparados especialmente para este biocarburante. Ya se empiezan a fabricar vehículos capaces de reconocer el tipo de carburante y auto ajustarse.

3.3.1 FABRICACIÓN DE BIOETANOL

El bioetanol es un alcohol etílico que se obtiene a partir de diferentes materias primas, ricas en azúcares, fáciles de extraer y transformar mediante una fermentación. Si la materia prima proviene de otros cultivos cuya energía se encuentra almacenada como

carbohidratos más complejos (almidón), o cultivos ricos en celulosa o hemicelulosa, se requiere una hidrólisis previa a dicha fermentación. Por tanto, el proceso productivo del bioetanol se puede dividir en tres bloques según la materia prima de la que se parta: sacarífera, amilácea y lignocelulósica, que se diferencian en la primera parte del proceso, pero coinciden en las últimas: fermentación, destilación y deshidratación (Figura II-30).

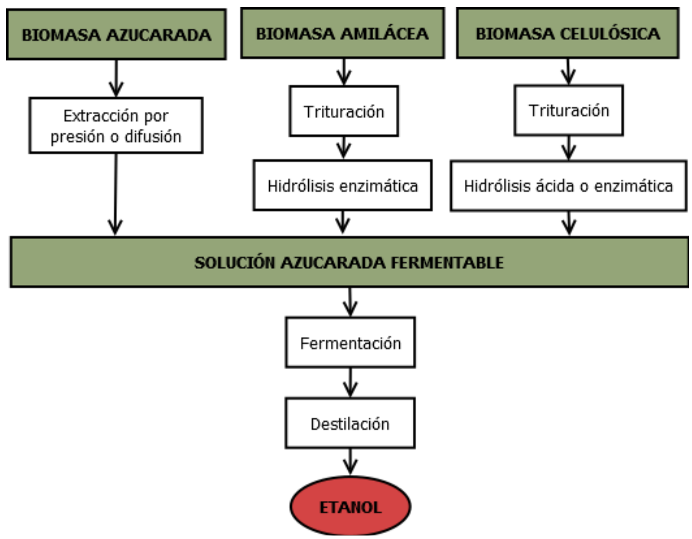


Figura II-30. Procesos básicos en la obtención de bioetanol en función del tipo de materia prima (Fuente: Elaboración propia)

3.3.1.1 Materias primas sacaríferas

Este tipo de materia prima permite que los procesos de obtención sean más sencillos que los de otras naturalezas, ya que los carbohidratos están contenidos en azucares simples (glucosa, frutosa, galactosa y sacarosa) fácilmente fermentables. Entre ellas destacamos la remolacha azucarera, la caña de azúcar, las frutas y las melazas. No requieren un tratamiento previo para obtener los azucares fermentables porque éstos se encuentran ya presentes.

La extracción de los azúcares se realiza de diferente forma en función del cultivo empleado. En general, se pueden distinguir varias metodologías:

- <u>Extracción mecánica con molinos</u>.- Cuenta con 5-7 molinos en tándem equipados con unos cilindros provistos de ranuras, lo que incrementa la superficie de extracción.
- <u>Extracción mecánica con prensa</u>.- Se realiza a través de un tornillo sin fin.
- <u>Extracción hidráulica por difusión</u>.- La materia prima se somete primero a trituración y a un lavado con agua a una temperatura de 50ºC. Posteriormente se procede a la inmersión de la pasta obtenida en una disolución menos concentrada. El azúcar se disuelve en el agua o en la disolución por ósmosis.

- Extracción por centrifugación.- la biomasa es mezclada con agua, sometida a temperaturas de unos 80ºC y homogeneizada con un tornillo. Posteriormente, y mediante centrifugación, se separa el zumo.

Como ejemplo, y en el caso concreto de la remolacha azucarera, los azúcares, que se acumulan en la raíz, se extraen a una temperatura de 70-80ºC por difusión en una solución acuosa, previo corte en láminas de las raíces. El subproducto de la extracción se denomina pulpa, que secada, puede utilizarse en la alimentación para animales.

En el caso del sorgo papelero, el subproducto se denomina bagazo y puede ser extraído de cualquiera de las formas antes descritas. El bagazo puede valorizarse como fertilizante o ser recuperado para la producción de energía térmica previa desecación.

3.3.1.2 Materias primas amiláceas

En este caso, el proceso de obtención necesita de la transformación del almidón contenido en los granos de los cereales en azúcares fermentables a través de una reacción de hidrólisis. Para ello se requiere de una molienda inicial cuyo objetivo es la reducción de la granulometría de las semillas para lograr mejores rendimientos en las sucesivas fases de la hidrólisis. Puede efectuarse de varias maneras:

- Molienda en seco (*Dry milling*).- Los granos se limpian y se trituran mecánicamente hasta que son reducidos a pequeñas partículas dando lugar a una harina. Para esta operación existe una amplia variedad de equipos de molienda, aunque los más empleados son los molinos de martillo y los de rodillos.
- Molienda en húmedo (*Wet milling*).- Este sistema se utiliza en plantas con grandes producciones de alcohol y cuando, además, se quieren obtener otros subproductos tales como el sirope, la fructosa, etc. En primer lugar, el grano es limpiado y "escaldado" en agua caliente (50ºC) durante 24-48 horas, ayudado por pequeñas concentraciones de dióxido de azufre y ácido láctico. Posteriormente, tienen lugar tres fases: (i) la extracción del germen a través de un separador, (ii) separación de la parte fibrosa de la mezcla mediante molienda y cribado y, (iii) separación del almidón de las proteínas mediante centrifugación.




Figura II-31. a) Molino de tambor para molienda en seco; b) molinos de maíz para molienda en húmedo (Fuentes: http://www.tradekorea.com y http://www.esuppliersindia.com)

3.3.1.3 *Materias primas lignocelulósicas*

La extracción de azúcares de este tipo de materia prima es más compleja que las dos anteriores. La celulosa y la hemicelulosa (convertibles en bioetanol) están unidas estructuralmente a la lignina (no transformable en bioetanol) en la pared celular, por lo que será necesaria su separación. Además, algunos azúcares simples liberados en la degradación de la hemicelulosa (xilosa, arabinosa, manosa) presentan fermentaciones muy difíciles.

El tratamiento al que es sometida la materia prima para romper la pared celular y separar los componentes hemicelulósicos y celulósicos de la lignina posee diversas modalidades en función de su naturaleza:

3.3.1.3.1 Pretratamientos físicos

- Trituración mecánica.- Se realiza la trituración de los materiales lignocelulósicos mediante una combinación de astillado y molienda, aumentando la superficie específica y la densidad aparente, lo que facilitará la hidrólisis posterior. Existen diferentes tipos de moliendas tales como, molino de bolas, martillos, cuchillas, rodillos, etc.
- Radiación de alta energía.- Mediante la cual se rompen los enlaces β-glucosídicos y los enlaces entre la celulosa y la lignina. Es un tratamiento de difícil aplicación ya que requiere de instalaciones complejas y de alto coste.

3.3.1.3.2 Pretratamientos químicos

Su objetivo es solubilizar la fracción de la lignina y modificar la estructura de la celulosa facilitando la posterior acción de las enzimas. Existen numerosos tipos:

- Agua caliente.- Se somete a la biomasa a la acción de agua caliente (220ºC) durante un tiempo determinado. Esto debe realizarse en condiciones presurizadas para que el agua se mantenga en estado líquido.
- Oxidación húmeda.- El material lignocelulósico se somete a la acción de agua a elevadas temperaturas en presencia de oxígeno. Su ventaja es la de no generar productos de degradación.
- Ozono.- Con este tratamiento se consigue la degradación total de la lignina, atacando apenas la hemicelulosa y la celulosa. No origina productos tóxicos y las condiciones de presión y temperatura son las ambientales. Sin embargo, y debido a las grandes cantidades de ozono que requiere, es un método muy caro.
- Hidróxido de sodio.- Este tratamiento se lleva a cabo con una disolución acuosa de la sosa del 8-12% en peso a temperaturas de 80-120ºC durante 30-60 minutos. Con él se consigue una separación de las uniones estructurales entre la lignina y los carbohidratos y una rotura de la lignina. Válido para pajas y para maderas duras con contenidos en ligninas de hasta un 18%.

- Organosolventes.- Para romper los enlaces internos de la lignina y la hemicelulosa se emplea una mezcla de solventes orgánicos (metanol, etanol, acetona, etc.) o acuosos, junto con un catalizador ácido (clorhídrico o sulfúrico).

3.3.1.3.3 Pretratamientos físico-químicos

Se combinan metodologías físicas y químicas:

- Explosión por vapor.- La biomasa se satura con agua mediante una presión de 1,5-4,0 Mpa y temperaturas elevadas (180-230ºC) durante un tiempo que oscila entre 1 y 10 minutos. Las condiciones del proceso desencadenan una hidrólisis parcial de las cadenas de celulosa y hemicelulosa.
- Explosión por vapor con dióxido de azufre.- El dióxido de azufre, utilizado en forma gaseosa, posee el efecto de acidificar la biomasa antes de que sea sometida al proceso de explosión a vapor. Así se favorece la hidrólisis de la celulosa y de la hemicelulosa.
- Explosión por vapor con amoniaco (AFEX).- La materia prima se somete a la acción del amoniaco a una temperatura de 27ºC y a una presión de 1,24 MPa. Para disminuir los costes del proceso, el amoniaco puede sustituirse por dióxido de carbono, aunque los rendimientos obtenidos son menores.

3.3.1.3.4 Pretratamientos biológicos

En este tipo de tratamientos el material lignocelulósico se somete a la acción de determinados microorganismos (ej. hongos basidiomicetos como *Phanerochaete chrysosporium*) que degradan la lignina y la hemicelulosa. A su vez, eliminan las barreras que protegen la celulosa, haciéndola más accesible al posterior ataque enzimático. La ventaja de esta metodología es el bajo requerimiento energético que se necesita y las suaves condiciones ambientales que requiere el proceso. Por el contrario, ha de citarse como inconveniente la lentitud de la hidrólisis.

3.3.1.4 Hidrólisis

Este proceso se realizará para las materias primas de naturaleza amilácea y lignocelulósica (Figura II-30).

3.3.1.4.1 A partir de materiales amiláceos

La harina obtenida en la fase de molienda, se mezcla con agua y con enzimas (α-amilasas) dando lugar a una pasta húmeda y viscosa con un 20-40% en peso de sólidos. Las α-amilasas agregadas en esta operación lograrán transformar una parte de las cadenas de almidón en dextrinas de longitud variable. Se suelen emplear α-amilasas de *Bacillus licheniformis* debido a su tolerancia a las altas temperaturas. Después se realiza una cocción donde se somete la pasta húmeda premezclada a altas temperaturas (hasta 180ºC), con el fin de romper y solubilizar los gránulos de almidón.

La tercera etapa es la licuefacción, donde se reduce la temperatura de la pasta (hasta 90ºC) y su viscosidad agregando nuevamente α-amilasas. En este punto se obtiene una mezcla de dextrinas y pequeñas cantidades de glucosa. Posteriormente, la pasta se

encuentra lista para someterse a la operación de sacarificación, donde las dextrinas se transforman en glucosa por la acción de las glucoamilasas, obtenidas a partir de *Aspergillus niger* o de *Rhizopus* spp. La temperatura de este último paso es de 60-70ºC y puede realizarse en un tanque separado o en el mismo recipiente donde se va a realizar la fermentación. En este último caso, se conoce con el nombre de sacarificación y fermentación simultáneas (SSF) (Ver siguiente apartado para materiales lignocelulósicos). Después, se enfría la pasta hasta 32ºC para que se inicie la fermentación alcohólica.

3.3.1.4.2 A partir de materiales lignocelulósicos

Los procesos de conversión de celulosa en etanol pueden dividirse en dos grandes grupos:

- **Procesos en dos etapas:** Con este tipo de metodología, la hidrólisis (que puede ser ácida o enzimática) y la fermentación pueden realizarse por separado.

  En los procesos que utilizan la vía enzimática, una parte de la biomasa pretratada se usa como sustrato para la obtención de las enzimas. Una vez producidas éstas se extraen del medio y se añaden al resto del material pretratado en un reactor de hidrólisis. En este punto, las enzimas descomponen la celulosa y la hemicelulosa en azúcares sencillos. La glucosa obtenida en este reactor pasa a otro, donde se realiza la fermentación a través de la acción de los microorganismos.

  Existen tres grandes grupos de enzimas que se emplean para romper las cadenas de celulosa y hemicelulosa en función del lugar de corte:

  - Endocelulasas (endoglucanasas).- Rompen al azar las cadenas de celulosa en el interior del polisacárido, generando fragmentos más pequeños de diferentes tamaños.
  - Exocelulasas (exoglucanasas).- Actúan sobre las extremidades de los polímeros, liberando azúcares simples (glucosa, celobiosa).
  - La β-glucosidasa.- Se encargan de degradar la celobiasa a monómeros de glucosa.

  Estas enzimas suelen aislarse de bacterias y hongos que habitan en aguas residuales, de hongos ascomicetes, del tracto intestinal de los animales herbívoros y de algunos insectos como escarabajos y termitas.

  La ventaja de este proceso es que al estar separadas la hidrólisis y la fermentación, ambas pueden efectuarse en sus condiciones óptimas: La hidrólisis se realiza a una temperatura de en torno a los 50ºC, y la fermentación se realiza a la temperatura óptima del microorganismo productor del etanol. Sin embargo, la principal desventaja de este método es que la glucosa y la celobiasa liberadas durante la etapa de hidrólisis enzimática, inhiben las enzimas implicadas en el proceso, por lo que se obtienen bajos rendimientos.

En el caso de una hidrólisis ácida, se emplea cualquier tipo de ácido concentrado o diluido, aunque en la práctica, y por razones económicas, se emplea de forma generalizada el ácido sulfúrico. El ácido disuelve los polisacáridos y los separa de la lignina. Después, la celulosa y la hemicelulosa se hidrolizan al diluirse los ácidos, y al aplicar calor, se obtienen azúcares fermentables. Esta metodología, aunque proporciona velocidades de reacción rápidas, destruye una gran cantidad de azúcares en el proceso y es costosa debido a su carácter corrosivo. Además, la generación de productos de degradación durante la hidrólisis puede afectar a los microorganismos encargados de realizar la fermentación.

- **Procesos en una etapa:** En los que la hidrólisis y la fermentación se realizan en el mismo reactor. Mediante estos procesos se consiguen mayores rendimientos de etanol que cuando se realiza la hidrólisis y la fermentación por separado, ya que la presencia de microorganismos fermentadores, junto con los enzimas celulolíticos reducen la acumulación de azúcar en el fermentador. Otra ventaja de esta tecnología combinada es que se realiza en un mismo reactor, por lo que se reducen los costes de inversión. Por el contrario, la principal desventaja de este proceso en una etapa es que hay que buscar unas condiciones de pH y de temperatura compatibles con la hidrólisis y con la fermentación. Por ejemplo, las condiciones de temperatura óptimas para la hidrólisis están próximas a los 50ºC, mientras que las de las fermentaciones con levaduras trabajan en torno a los 37ºC. Por tanto, se aconseja el uso de microorganismos termotolerantes si se lleva a cabo este proceso. Entre las levaduras más citadas en bibliografía capaces de realizar fermentaciones alcohólicas por encima de los 40ºC se encuentran aquellas que pertenecen a los géneros *Candida*, *Saccharomyces* y *Kluyveromyces*.

  Los procesos en una etapa se dividen en dos grupos: aquellos en los que el mismo microorganismo produce los enzimas y realiza la fermentación, denominado Conversión Directa por el Microorganismo (CDM), y aquellos en los que se emplean celulasas provenientes de un microorganismo celulolítico (normalmente un hongo), junto con la presencia de un microorganismo productor de etanol, que son los denominados procesos de Sacarificación y Fermentación Simultánea (SFS). Este último es el que ofrece mejores expectativas, obteniéndose las celulasas del hongo *Trichoderma reesei*, y utilizando una levadura como microorganismo fermentador.

3.3.1.5 Fermentación

La fermentación es el proceso durante el cual los azúcares simples que se obtienen de las fases anteriores son transformados en bioetanol gracias a la acción de determinados microorganismos. El más común es la levadura natural *Saccharomyces cerevisiae* (Figura II-32), que presenta una actividad óptima a temperaturas de 33-35ºC a un pH ácido entre 3 y 5. Esta levadura acumula el bioetanol en su crecimiento hasta concentraciones del 11%.



Figura II-32. Saccharomyces cerevisiae

Existen numerosas técnicas de fermentación entre las que cabe destacar:

3.3.1.5.1 Fermentaciones discontinuas o por lotes (Batch)

Son aquellas fermentaciones donde la formación del producto (etanol) está directamente relacionada con la utilización del sustrato (o caldo de fermentación). La fermentación comienza en condiciones aerobias, con crecimientos bajos de los microorganismos (que se están adaptando a las condiciones del caldo de fermentación) y, por tanto, sin producción de etanol. Posteriormente, se produce una fase de crecimiento exponencial de las poblaciones de microorganismos, con una producción también exponencial de etanol, condicionada por la concentración inicial de sustrato. Cuando se agotan los nutrientes en el caldo de fermentación, y se da un efecto inhibidor de la concentración de etanol en el medio, se detiene el crecimiento de los microorganismos y, por tanto, la producción de etanol.

3.3.1.5.2 Fermentación continua

Este tipo de fermentación funciona como un sistema abierto. En el caso más simple se introduce una cantidad constante de alimentación al biorreactor compuesta por sustrato (azúcares), medio de cultivo, nutrientes y oxígeno. Al mismo tiempo, se extrae una cantidad similar de producto compuesto por etanol, células y azúcar residual, de tal forma que se alcanza un estado estacionario deseable dentro del sistema. La cantidad de células que se pierden en el flujo de salida debe igualarse con el crecimiento de microorganismos dentro del biorreactor.

La productividad de los procesos continuos suele ser tres veces mayor a la de procesos por lotes, pudiendo alcanzar hasta 6 g/l.hora si utilizamos cepas de levaduras altamente productivas. Además, los costos del biorreactor son menores en comparación a los procesos discontinuos y los requerimientos de mantenimiento son menores.

3.3.1.5.3 Fermentación fed-bacth y fermentación semi-discontinua

Estas tecnologías se presentan como soluciones intermedias entre una fermentación en discontinuo (*in batch*) y en continuo, añadiendo los sustratos de forma escalonada al biorreactor, en intervalos particulares de tiempo. En la fermentación *fed-batch* se realiza la alimentación intermitente con un sustrato nutritivo, que contiene los microorganismos. En la fermentación semi-discontinua se añaden periódicamente los microorganismos. Su aplicación a nivel industrial es todavía escasa.

3.3.1.5.4 Fermentación extractiva

Se lleva a cabo una extracción en continuo del bioetanol, que puede ser conseguida mediante diferentes alternativas:

- **Extracción líquido-líquido.-** El medio fermentado se recoge en la cabecera del fermentador y se centrifuga. La levadura se recicla y el medio clarificado se mezcla con un solvente de extracción (polipropileno-glicol). Posteriormente se decanta y se recupera el bioetanol por destilación.

- **Extracción con membrana.**- El medio fermentado, y prelavado en la cabecera del fermentador, pasa a lo largo de una membrana permeable al bioetanol y al solvente. En la actualidad hay tres tipos de membranas disponibles: ultrafiltración (permeabilidad en función de las dimensiones de las partículas), de destilación (permeabilidad en función del vapor de los compuestos) y de pervaporación en silicón o polidimetilsiloxano (permeables solamente al bioetanol). Los elevados costes de estas membranas limitan la utilización de este tipo de fermentación.
- **Extracción mediante evaporación en continuo (proceso *Vacuferm*).-** La fermentación se efectúa a baja presión (30-50 mmHg) con una posterior evaporación en continuo del etanol a la temperatura de fermentación. Este método presenta elevados rendimientos, pero debido a su alto coste energético no se ha aplicado a nivel industrial.

3.3.1.5.5 Fermentación por dialisis

En este caso el reactor está dividido en dos cámaras separadas por una membrana impenetrable para las levaduras, pero permeable al sustrato y al bioetanol. Es una técnica poco rentable debido al alto coste de la membrana.

3.3.1.5.6 Fermentación alcohólica

Este tipo de fermentación se desarrolla de forma análoga para todas las producciones de la cadena del bioetanol, independientemente de la naturaleza de la materia prima empleada, salvo en el caso de materias lignocelulósicas, ya que la levadura natural no resulta eficiente en presencia de azúcares simples de difícil fermentación.

3.3.2 Características físico-químicas del bioetanol

Gracias a sus características, el bioetanol es considerado un sustituto de la gasolina en los motores de ciclo Otto. La siguiente tabla muestra las características físico-químicas que hacen posible su utilización en este tipo de motores:

Tabla II-3. Características físico-químicas del etanol y de la gasolina (Fuente: Agencia Andaluza de la Energía 2011)

PROPIEDAD	GASOLINA	ETANOL
Peso molecular	100/105	46
Oxígeno (% en peso)	0	34,8
Densidad (kg/m^3)	720/780	794
PCI (MJ/kg)	42,7	26,8
Dosado estequiométrico	14,8	9
Solubilidad en agua (%)	0,1	100
Calor latente de vaporización (MJ/kg)	0,3	0,85
Tª de ebullición (ºC)	30/215	78
RVP a 38ºC (kPa)	48/78	16
Índice RON (nº de octanos en ciudad)	95/98	120/135
Índice MON (nº de octanos en carretera)	85/90	100/106

***RVP:** Tensión de Vapor Reid*

De estos datos se desprende que algunas propiedades del bioetanol son mejores que la gasolina. Así, su mayor octanaje dará lugar a una mayor capacidad antioxidante que la gasolina, y su mayor volatilidad (expresada en Tª de ebullición y tensión de vapor), hace que la mezcla con el aire sea más rápida y homogénea en la carburación, y que el proceso de combustión, el arranque en frío del motor y las prestaciones en aceleración sean mejores que las que se obtienen con la gasolina. Por el contrario, los valores del PCI de esta tabla muestran una densidad energética de la gasolina mejor que la del bioetanol.

3.3.3 Ventajas e inconvenientes del uso de bioetanol

Algunas de las ventajas de usar el bioetanol son:

- **Fuente de combustible limpia y renovable:** ya que emite entre un 40 y un 80% menos de gases promotores del efecto invernadero que los combustibles fósiles, reduce la lluvia ácida, mejora la calidad del aire en zonas urbanas, no contamina el agua y reduce la dependencia del petróleo del extranjero.
- **Mejora del índice de octanos:** con un bajo coste.
- **Mejora la biodegradabilidad de la gasolina:** cuando se utiliza mezclado con esta.
- **Reduce la toxicidad de la gasolina:** su mezcla con la gasolina permite la reducción del número de compuestos aromáticos, reduciendo por tanto las emisiones de benceno a la atmósfera. Su uso como aditivo de la gasolina, además, genera menos monóxidos de carbono.
- **Es un combustible fácil de producir y de almacenar:** es menos inflamable que la gasolina.

Pero también posee una serie de inconvenientes:

- **Menor poder calorífico que la gasolina:** esto hace que se requiera un mayor consumo para obtener el mismo resultado ya que, de media, contiene 2/3 de la energía contenida en un mismo volumen de gasolina.
- **Costes mayores de elaboración:** De momento, la elaboración de etanol a partir de semillas vegetales es aproximadamente 1,5 veces más caras que la obtención de gasolina.
- **Necesidad de modificaciones dentro del motor:** si se desea utilizar el bioetanol como combustible puro (E100) se necesita llevar a cabo diversas modificaciones en el motor para no alterar significativamente el consumo. Entre ellas cabe destacar: aumento la relación de compresión, variar la mezcla de combustible/aire, introducir bujías resistentes a mayores temperaturas y presiones, sustituir los conductos por materiales resistentes al ataque de alcoholes o añadir mecanismos que faciliten el arranque en frío.
- **Genera emisiones de óxidos de nitrógeno y aldehídos:** el bioetanol genera más emisiones de compuestos orgánicos volátiles (culpables del ozono de superficie)y aumenta un 5% la emisiones de NOx, en relación a la gasolina.

- **Afinidad al agua:** Los sistemas de transporte y almacenamiento deben estar totalmente libres de agua ya que, incluso con pequeñas cantidades de agua, las mezclas de etanol-gasolina pueden separarse en dos fases, lo que reduce el rendimiento del motor.

3.4 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

AGENCIA ANDALUZA DE LA ENERGÍA. 2011. Estudio básico sobre el sector de los biocarburantes. Consejería de Economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía.

Fernández JM. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. A. Madrid Vicente ed. Madrid. ISBN 978-84-96709-62-1

García-Camús JM, García-Laborda JA. 2006. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM. Fundación para el conocimiento madri+d. Madrid, 125 pp.

González AD, Kafarov V, Guzmán Monsalve, A. 2009. Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. Prospect, 7:53-60.

Martínez-Anaya C, Balcázar-López E, Dantán-González E, Folch-Mallol JL. 2008. Celulasas fúngicas: Aspectos biológicos y aplicaciones en la industria energética. Revista Latinoamericana de Microbiología, 50:119-131.

Memoria AOP. 2007. El ABC de los Biocarburantes. Asociación Española de Operadores de Productos Petrolíferos.

Navarro JM. 2011. Análisis de viabilidad económica de biocombustibles de cuarta generación. PFC Ingeniero en Organización Industrial. ICAI. Universidad Pontífica de Comillas.

Oliva JM. 2003. Efecto de los productos de degradación originados en la explosión por vapor de biomasa de chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*. Tesis doctoral. Departamento de Microbiología III. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

Patente Nacional nº 201001411. Fecha: 29-10-2010. Título: "Árboles transgénicos con mayor cantidad de biomasa y de carbohidratos". Departamento de Biología Molecular y Bioquímica. Universidad de Málaga.

PER 2011-2020. Plan de Energías Renovables 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España

VirtualPRO. 2007. I Seminario-Taller Biocombustibles. BIODIESEL-BIOETANOL. Revista Virtual de Ingeniería en procesos industriales. Bogotá, Colombia.

4 BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Entre los biocombustibles gaseosos que se pueden generar a partir de la biomasa están el gas de síntesis, que se obtiene a partir del proceso de gasificación, el biogás, que se obtiene mediante una digestión anaerobia con la ayuda de microorganismos, y el hidrógeno, que puede obtenerse a partir de numerosas tecnologías.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso (residuo orgánico) se transforma en un gas combustible de bajo poder calorífico, a través de una serie de reacciones que ocurren a una temperatura determina en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno y/o vapor de agua). El producto obtenido es un gas de síntesis denominado **syngás,** que puede utilizarse como combustible para generar vapor o electricidad, o como productor de materia prima en la industria química. También puede utilizarse en un gran número de procesos industriales.

El **biogás** se genera por las reacciones de biodegradación de residuos vegetales y animales (ej. estiércoles, aguas residuales o residuos agrícolas y de industrias agroalimentarias), mediante la acción de microorganismos y en condiciones anaerobias. Generalmente, el biogás se produce en biodigestores, que son sistemas que aprovechan las digestiones anaerobias de las bacterias que ya habitan en la materia prima, para transformar ésta en biogás y en fertilizante (digestato). El biogás puede ser empleado como combustible en cocinas, iluminación y calefacción domésticas, o en grandes instalaciones, alimentando a motores que generen electricidad.



Figura II-33. a) Gasómetros de la EDAR de Valladolid; b) Planta de biogás alimentada por residuos de la industria alimentaria (Fuentes: http://www.biometsa.es y http://www.bentec.es)

En la actualidad, alrededor de la mitad de hidrógeno que se produce en el mundo se obtiene a partir de procesos termocatalíticos y de gasificación, que utilizan gas natural como materia prima. Otras fuentes importantes de H_2 requieren aceites pesados y naftas, seguidas por el carbón natural, estando sólo el 4% del hidrógeno generado a

partir de la electrolisis del agua. Sin embargo, la mayoría de estos procesos requieren elevados gastos energéticos y dependen, además, de recursos no renovables. Estos hechos, unido a que las reservas mundiales de hidrocarburos se han reducido a una velocidad alarmante, hacen que la producción biológica de hidrógeno (**biohidrógeno**: Bio-H_2), a partir de biomasa, resulten ser una alternativa muy interesante como recurso sostenible para un futuro.

4.2 GAS DE SÍNTESIS

El gas de síntesis, o syngás, se produce al someter a la biomasa a altas temperaturas (entre 800 y 1.500ºC) en ausencia de oxígeno. Con este proceso se obtienen productos gaseosos con poderes caloríficos bajos (4,2-5 MJ/m^3) compuestos por N_2, CO, H_2, CH_4 y CO_2 en proporciones variables. Se lleva a cabo en los denominados gasógenos, que se utilizan con fines térmicos o, en combinación con motores, para producir energía mecánica o eléctrica.

El rendimiento del proceso de gasificación varía entre un 70 y un 80%, en función de la tecnología empleada y del combustible o el tipo de agente gasificante que se utilice. El resto de la energía se invierte en las reacciones endotérmicas del proceso, en las pérdidas de calor de los reactores, en el secado, filtrado y lavado del syngás.

En principio, el destino del gas de síntesis suele ser la producción de calor por combustión directa en un quemador o la generación de electricidad por medio de un motor o turbina. En la actualidad, los procesos de gasificación avanzada, basados en sistemas de lecho fluidizado, son los más prometedores para la generación de electricidad, con una alta eficiencia en base a ciclos combinados de turbina de gas y ciclo de vapor. Para esta finalidad es muy importante la obtención de gases limpios.

4.2.1 Gasificación

4.2.1.1 Etapas

Independientemente de la tecnología utilizada en la gasificación, la biomasa pasa por varias etapas (Figura II-34), cuyo orden e importancia depende del combustible y de los elementos del agente gasificante utilizado, pero que pueden agruparse en tres:

- **Pirólisis o descomposición térmica:** En primer lugar, la biomasa sufre un proceso de secado y de precalentamiento al entrar en el gasificador. Posteriormente, y en ausencia de oxígeno, el combustible se descompone en una mezcla de sólido, líquido y gas. Al sólido originado se le denomina "*char*" y a los líquidos, debido a la presencia de alquitranes y vapores condensables, se les llama "*tar*".
- **Oxidación o combustión:** Esta fase tiene lugar cuando el agente gasificante es un oxidante como el oxígeno o el aire, dando lugar a una serie de reacciones de oxidación, fundamentalmente exotérmicas. Mediante ellas se genera el calor necesario para que el proceso se mantenga.

- **Reducción o gasificación:** Esta fase la constituyen las reacciones en las que el sólido remanente se convierte en gas. Son reacciones fundamentalmente endotérmicas. Las etapas de oxidación y reducción pueden considerarse conjuntamente en una sola etapa de gasificación en la que tienen lugar todo tipo de reacciones posibles entre el *char* y la mezcla gaseosa presente.

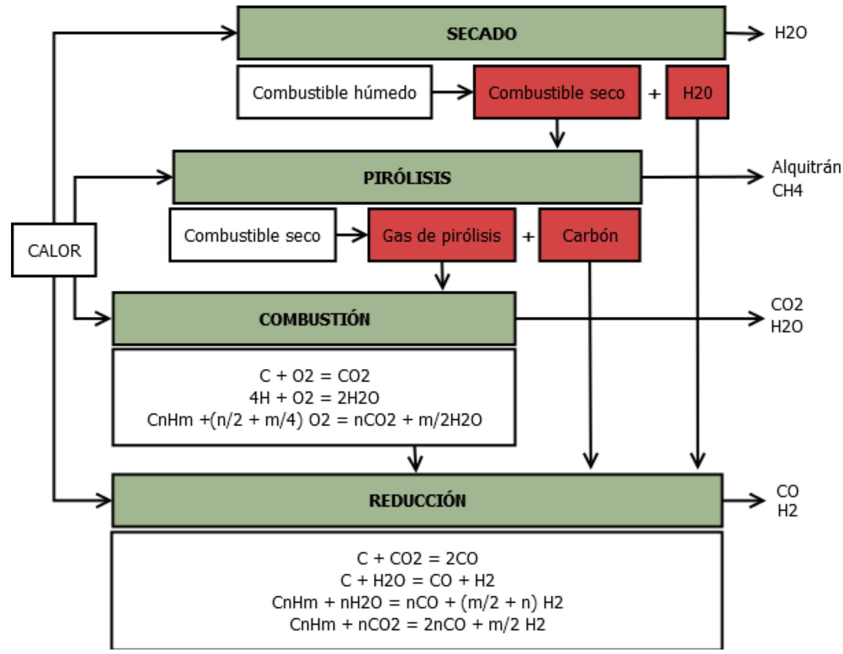


Figura II-34. Etapas de la gasificación (Fuente: http://www.btgworld.com)

4.2.1.2 Tipo de biomasa

En general, las tecnologías de gasificación permiten el procesado de cualquier tipo de combustible, siempre que tengan densidades superiores a 200 kg/m^3. Si la densidad es menor pueden darse problemas en los conductos y se complica la gasificación en la tecnología de lecho fluidizado. También es aconsejable que el tamaño de la materia prima sea homogéneo y lo suficientemente pequeño para que las reacciones químicas se produzcan a una velocidad adecuada en el menor volumen posible. Así, un tamaño de partícula pequeño aumenta la calidad del syngás, y permite reducir el tamaño del reactor o aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes). Sin embargo, se aconseja que el tamaño de partícula no sea menor de 2-3 mm de diámetro para evitar atascamientos en los conductos.

La humedad idónea de la materia a gasificar se encuentra en torno al 10-15%, ya que si estos valores son inferiores, la biomasa tenderá a recuperar humedad al contacto con el aire, y si tenemos valores por encima de éstos, se facilitará la formación de H_2 pero se reduciría la eficiencia térmica del proceso.

4.2.1.3 Agentes gasificantes

Según el agente gasificante utilizado en la gasificación, se producen efectos distintos en el producto final, variando el poder calorífico y la composición del syngás.

Si se gasifica con **aire**, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto sufre una reducción, obteniendo lo que se denomina "gas pobre". Este gas está formado básicamente por N_2 (~50% al 65%), CO (~20% al 30%), CO_2 (~1 al 15%), H_2 (~4% al 20%) y CH_4 (~1 al 5%). Este syngás posee un PC que ronda los 5,5 MJ/Nm^3 y se utiliza en los motores de combustión interna convencionales.

La gasificación con **vapor de agua** u **oxígeno** aumenta la proporción de H_2 en el syngás, lo que proporciona una materia prima más adecuada a la hora de elaborar metanol o gasolina sintética. En este caso, el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, pero el oxígeno tiene un coste energético (y por tanto económico) que hay que tener en cuenta.

Por último, si se utiliza **H_2** como agente gasificante el syngás obtenido podría sustituir al gas natural ya que puede alcanzar un PC de 30 MJ/kg.

4.2.1.4 Catalizadores

Se utilizarán unos y otros dependiendo de la tecnología empleada y de las condiciones de gasificación (relación biomasa/gasificante, tiempo de residencia, etc.). Así, si se gasifica a temperaturas inferiores a 550ºC, se utilizan catalizadores de **reformado de níquel** o **cobalto**, que favorecen la reducción en la formación de alquitranes. Los catalizadores basados en **zeolitas** o **dolomías**, permiten trabajar con temperaturas inferiores en la zona de reducción (pasando de 1.100ºC a 800-900ºC), pero si se desea facilitar la formación de CO e H_2, se deberán utilizar catalizadores de **níquel** y **cobalto**, que trabajan a temperaturas de entre 700 y 800ºC en la fase de reducción.

4.2.2 Tipos de gasificadores

Los diferentes tipos de gasificadores pueden clasificarse en:

- **Lecho móvil (fijo) o descendente**
  - Contracorriente *("Updraft")*
  - Corriente paralela *("Downdraft")*
  - Corriente cruzada *("Crossdraft")*
- **Lecho fluidizado**
  - Burbujeante
  - Circulante
  - Arrastrado
- **Otros tipos**
  - Rotatorios
  - Reactores paralelos o dobles

A continuación se desarrollan los más extendidos:

4.2.2.1 De lecho fijo (móvil) o descendente

Este tipo de gasificadores puede utilizarse tanto con aire como con O_2 y vapor de agua. La biomasa se introduce en el gasificador por la parte superior y la extracción de cenizas se realiza generalmente por la parte inferior del lecho. La velocidad de descenso del lecho se regula mediante la extracción de las cenizas. Este sistema posee como ventaja su simplicidad y los costes de inversión relativamente bajos, sin embargo, es muy sensible a las características mecánicas del combustible, requiriendo combustible uniforme y homogéneo.

4.2.2.1.1 En contracorriente (Updraft)

El sólido y el gas circulan en direcciones contrarias. El sólido desciende lentamente y los agentes gasificantes (aire y oxígeno y vapor) circulan en dirección ascendente (Figura II-35a). Al descender la biomasa, es calentada por la corriente de gas hasta llegar a la zona de combustión donde se alcanza la máxima temperatura, sufriendo un enfriamiento posterior previo a la descarga de cenizas. La regulación de la temperatura se realiza mediante la inyección de vapor de agua. En general se obtiene un gas bastante contaminado ya que, las bajas temperaturas de los gases (250-500ºC) no permiten la descomposición de aceites, alquitranes y gases formados (fenoles, amoníaco y H_2S). El gas de síntesis obtenido sale del reactor por la parte superior.

4.2.2.1.2 En corrientes paralelas (Downdraft)

El sólido y el gas circulan en la misma dirección dentro del gasificador. La biomasa, que se introduce por la parte superior, es sometida a un aumento progresivo de la temperatura, secándose al principio y pirolizándose más abajo. Este patrón de temperaturas se origina gracias a las elevadas temperaturas que se generan en la parte inferior del reactor, mediante la combustión parcial de los productos que llegan hasta allí (gases, alquitranes y carbón). En este caso, el gas de síntesis se libera por la parte baja del gasificador y el suministro de aire se realiza por la parte media del mismo (Figura II-35b).

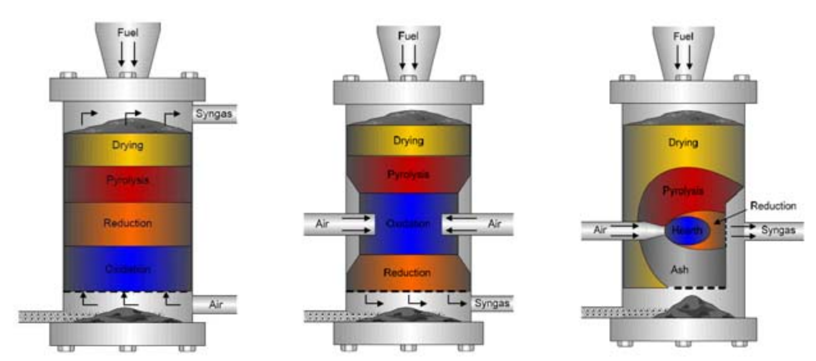


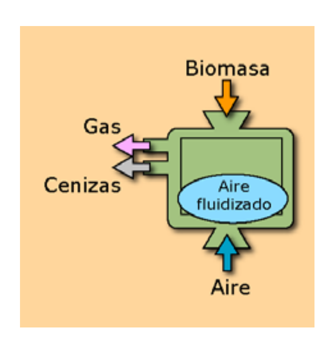
Figura II-35. Tipos de gasificadores de lecho fijo descendente: a) updraft; b) downdraft; c) crossdraft (Fuente: Bull 2008)

4.2.2.1.3 Corrientes cruzadas (Crossdraft)

En este caso el agente oxidante se introduce por un lateral del reactor, saliendo el gas de síntesis por el lado diametralmente opuesto (Figura II-35c). Este gasificador posee ciertas ventajas sobre los anteriores ya que tiene tiempos de arranque inferiores, puede operar con combustibles secos y húmedos, y la temperatura del gas que se obtiene es relativamente alta, por lo que la composición del gas producido contiene pequeñas cantidades de H_2 y CH_4. Como desventaja, el alto contenido en alquitrán que se obtiene en el proceso.

4.2.2.2 De lecho fluidizado

No existen unas zonas definidas del reactor donde se lleven a cabo los diferentes procesos, sino que éstos se efectúan simultáneamente en todos los lugares del gasificador. El agente gasificante se suministra a una velocidad suficiente para mantener en suspensión a las partículas sólidas. Éstas, al introducirse en el lecho, se mezclan rápidamente con el material, calentándose instantáneamente, de forma que la pirólisis del combustible se realiza de forma muy rápida. El agente gasificante puede ser oxígeno, vapor, gas resultante de un reciclado, o una combinación de éstos.



La mayoría de las instalaciones de grandes dimensiones construidas en la última década usan diseños de lecho fluidizado.

4.3 BIOGÁS

Se entiende por biogás a la mezcla de gases que se originan a partir de la descomposición de la materia orgánica, con la ayuda de microorganismos y en condiciones anaerobias. Este proceso se denomina digestión anaerobia o biometanización. La proporción de mezcla de gases depende del sustrato digerido, estando en general formada por un 50-70% de metano (CH_4), un 30-40% de dióxido de carbono (CO_2), y pequeñas proporciones de ácido sulfhídrico (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), y otros. Este biogás puede producirse tanto de forma natural (residuos orgánicos enterrados), como artificialmente, en dispositivos denominados biodigestores (Figura II-36).

Su elevado contenido en metano le proporciona una elevada capacidad calorífica (entre 18,8 y 23,4 kcal/m^3), por lo que, tras ser depurado para eliminar el vapor de agua y el ácido sulfhídrico, es utilizado en calderas, cuando su producción es pequeña, o en motores de cogeneración para la generación de electricidad y calor, cuando la producción es mayor. Además, si se realiza una purificación adecuada del biogás (hasta alcanzar entre un 91-95% en metano) también puede emplearse como combustible para vehículos, pilas de combustible o ser incorporado a la red de gas natural.



Figura II-36. Imágenes de un biodigestor casero y de un biodigestor industrial

La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. El digestato que se obtiene de la digestión anaerobia, puede utilizarse como enmienda para el suelo, ya sea de forma directa, o tras ser sometido a un proceso de separación sólido-líquido y posterior estabilización de la fracción sólida (compostaje).

En España existe una gran cantidad y diversidad de residuos orgánicos biodegradables, susceptibles de ser empleados para la producción de biogás (Tabla II-4).

Tabla II-4. Residuos orgánicos utilizables en una planta de biogás (Fuente: www.fiaf.es)

AGRICULTURA, PESCA Y GANADERÍA	INDUSTRIA ALIMENTARIA	OTRAS INDUSTRIAS	COMUNIDADES
Granjas de porcino, vacuno y de aves	Conserveras	Biodiésel	FORSU (Fracción orgánica de RSU)
Explotaciones agrícolas	Cervezas, Zumos y otras bebidas	Bioetanol	Hoteles, restaurantes y catering
Cooperativas agrícolas	Lácteas	Biorefinerías	Super e Hiper mercados
Piscifactorías y acuicultura	Cárnicas y Pescado	Bioquímica	Mercados centrales
Cultivos energéticos	Azucareras	Farmaceutica	Jardines y campos de Golf
	Almidón	Papelera	EDAR urbanas
	EDARIs alimentarias	Algas	

4.3.1 La digestion anaerobia

Como ya se ha expuesto anteriormente, se define digestión anaerobia al proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, se descompone en productos gaseosos (biogás) tales como CH_4, CO_2, H_2, H_2S, y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc) y compuestos de difícil degradación. Este proceso puede llevarse a cabo, como también se ha visto en el apartado anterior, con materias primas provenientes de diversos orígenes, siempre y cuando éstas sean líquidas, posean materiales fermentables, y una composición y concentraciones relativamente estables.

De manera artificial, el proceso se lleva a cabo en un biodigestor o digestor de desechos orgánicos, consistente en un contenedor cerrado, hermético e impermeable (reactor) que va a contener el material orgánico a fermentar diluido en agua.

El proceso se divide en varias fases consecutivas en las que el sustrato se degrada progresivamente gracias a la acción de distintas poblaciones de microorganismos, las cuales poseen velocidades de crecimiento diferentes. Así, contamos con bacterias fermentativas e hidrolíticas, bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, bacterias homoacetogénicas y las metanogénicas hidrogenotróficas (consumidoras de hidrógeno) y metanogénicas acetoclásticas (Figura II-37).

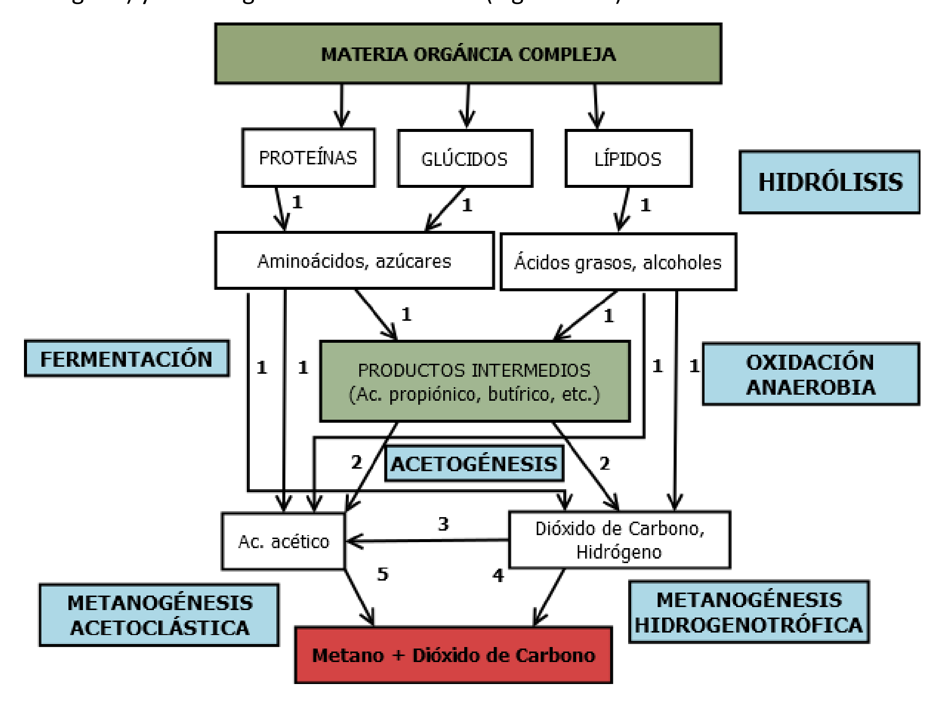


Figura II-37. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de bacterias implicados: 1) fermentativas e hidrolíticas; 2) acidogénicas; 3) acetogénicas; 4) metanogénicas hidrogenotróficas; 5) metanogénicas acetoclásticas (Fuente: modificado IDAE 2007).

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por microorganismos fermentativos. Como resultado de esta fase se producen compuestos solubles que serán metabolizados por las bacterias anaerobias en el interior de las células. Estos compuestos solubles, formados principalmente por aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes, son fermentados por los organismos acidogénicos, dando lugar a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, CO_2 y H_2. Después, y gracias a los microorganismos acetogénicos, estos ácidos grasos de cadena corta son transformados en acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, tiene lugar la

metanogénesis que produce metano a partir tanto del acido acético, como del hidrógeno y del dióxido de carbono.

En general, la velocidad del proceso está limitada por la velocidad de la fase más lenta, y dependerá directamente de la naturaleza del residuo. Por ejemplo, para sustratos solubles, la etapa limitante es la metanogénesis, pero en residuos en los que la materia orgánica se presenta en forma de partículas la fase limitante es la hidrólisis, ya que este proceso depende de la superficie de las partículas.

El proceso, que tiene una duración variable en función del tipo de bacterias adaptadas a un rango de temperaturas determinado, se realiza teniendo en cuenta los siguientes parámetros ambientales y de control:

- **Temperatura:** Existen tres rangos de temperatura en los que las cepas específicas de las bacterias están activas, pudiendo ser psicrofílicas (<30ºC), mesofílicas (30-40ºC) y termofílicas (40-55ºC). Estas últimas son las que desarrollan mayor actividad, y en su rango de temperaturas se asegura la destrucción de organismos patógenos, aunque también aumenta la sensibilidad a inhibidores como el amoniaco.
- **Humedad:** Se necesita un contenido de humedad en el sustrato de al menos un 50% para que las bacterias proporcionen buenos rendimientos.
- **Condiciones anaerobias:** Las bacterias se activan solamente en ausencia de oxígeno.
- **pH y alcalinidad:** El valor del pH en el digestor debe ser próximo a la neutralidad, presentando problemas graves si se baja de 6 o se sube por encima de 8,3. Por otro lado, la alcalinidad (como medida de la capacidad tampón del medio), se deberá mantener por encima de 2,5 g/l de bicarbonato para evitar la acidificación del reactor.
- **Contenido de nutrientes:** Las bacterias necesitan de determinadas cantidades de compuestos solubles de nitrógeno, minerales, oligoelementos y vitaminas para que su metabolismo funcione correctamente. Los principales nutrientes del sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y vitamina B_{12}. En el caso del nitrógeno, habrá que tener cuidado con su exceso, ya que puede provocar la formación excesiva de amoniaco, con efectos tóxicos. Cuando se utiliza estiércol como componente del sustrato, estas sustancias se encuentran en cantidades suficientes.
- **Velocidad de carga orgánica (VCO) y tiempo de retención hidráulico (TRH):** Las bacterias necesitan un mínimo de carga orgánica (materia orgánica seca/m^3 de reactor.día) como alimento para sobrevivir. Su valor óptimo dependerá de cada instalación y de cada residuo a tratar. En cuanto al tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos, dependerá típicamente del tipo de reactor utilizado y de la temperatura, siendo de entre 40 y 100 días para bacterias psicrofílicas, de 25 a 40 días para bacterias mesofílicas y entre 15 y 25 días para las bacterias termofílicas.

- **Reacciones pausadas y agitación:** Deben evitarse los cambios bruscos en las condiciones del proceso. La alimentación del digestor (agua y sustrato) deber realizarse de forma gradual. En función de la tipología del reactor, se debe suministrar al sistema un nivel de energía suficiente para favorecer la transferencia de sustrato a cada población de microorganismos, así como para homogeneizar y mantener unas concentraciones medio-bajas de inhibidores.
- **Tamaño de las partículas:** Las partículas en el sustrato no deben ser demasiado grandes para que las bacterias dispongan de suficiente superficie para llevar a cabo su cometido.
- **Tóxicos e inhibidores de bacterias:** Algunas sustancias que pueden estar presentes en los estiércoles como desinfectantes y antibióticos, impiden que las bacterias realicen su actividad e incluso pueden llegar a matarlas. Así mismo, concentraciones elevadas de nitrógeno amoniacal, ácidos grasos volátiles, hidrógeno, compuestos azufrados, ácidos grasos de cadena larga o pequeñas concentraciones de cationes y metales pesados, pueden inhibir las diferentes fases del proceso de digestión anaerobia.

4.3.2 Tipos de sistemas de digestión anaerobia

Los digestores utilizados para realizar el proceso de digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener elevadas concentraciones de microorganismos en el reactor, a través de diferentes métodos:

4.3.2.1 Reactores sin retención de biomasa

4.3.2.1.1 Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación

Mantiene una distribución uniforme de las concentraciones de sustrato y microorganismos gracias a un sistema de agitación. La agitación puede realizarse de forma mecánica o neumática, pero nunca de forma violenta. Su tiempo de retención es elevado. Es el más utilizado para residuos ya que no ofrece problemas de diseño (Figura II-38a).

4.3.2.1.2 Reactor de mezcla completa (RMC) con recirculación ó reactor anaerobio de contacto

Este sistema es equivalente al sistema de fangos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales. Difiere del anterior porque existe un sistema de decantación para los microorganismos y se recirculan posteriormente. Antes del decantador se dispone de un sistema de desgasificación que favorece la decantación. Este sistema sólo puede aplicarse a aguas residuales que presenten una alta carga orgánica (ej. aguas residuales de azucareras o cerveceras) en las que es posible la separación de las fases líquido-sólido, con una fracción sólida consistente básicamente en flóculos biológicos (Figura II-38b).

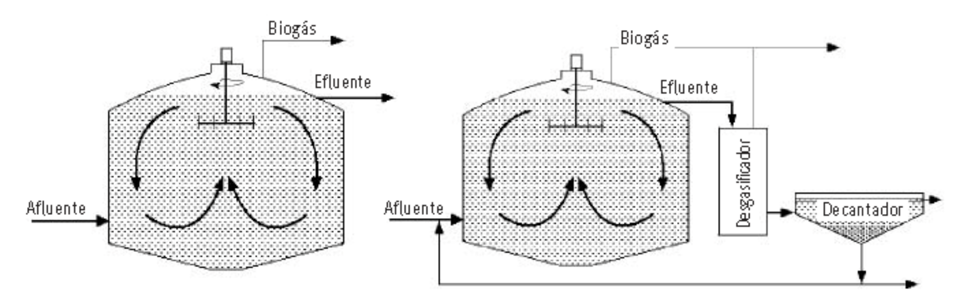


Figura II-38. Reactores sin retención interior de biomasa. a) Reactor de mezcla completa (RMC) sin recirculación; b) RMC con recirculación (Fuente: IDAE 2007)

4.3.2.1.3 Digestor de flujo pistón

Este tipo de reactor posee un tiempo de retención inferior a los anteriores debido a que la tasa de crecimiento de los organismos es más elevada a la entrada del reactor (donde la concentración de sustrato es también más elevada), lo que hace que la concentración media en el reactor sea superior a la de los reactores de mezcla completa (Figura II-39c).

4.3.2.1.4 Digestor discontinuo

En este sistema (Figura II-39d), la curva de evolución temporal de la producción de biogás sigue la misma tendencia que la curva típica del crecimiento de microorganismos (latencia, crecimiento exponencial, estacionalidad y decrecimiento). Aquí el tiempo de retención no tiene sentido y se habla de tiempo de digestión. Si se quiere conseguir una producción cercana a la continuidad deberán combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas en el tiempo.

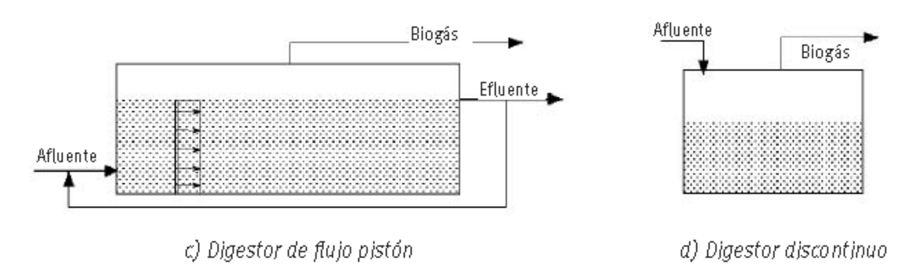


Figura II-39. Reactores sin retención interior de biomasa. c) Digestor de flujo pistón; d) Digestor discontinuo (Fuente: IDAE 2007)

4.3.2.2 Reactores con retención de biomasa

Este tipo de dispositivos permite la retención de bacterias en el interior para reducir así el tiempo de retención empleado en los reactores de mezcla completa. Los principales métodos de retención de biomasa son:

4.3.2.2.1 Filtros anaerobios y lecho fijo

En este sistema los microorganismos anaerobios están fijados a la superficie de un soporte inerte (formando biopelículas), columna de relleno, o atrapadas en los intersticios de éste con un flujo vertical. El soporte puede ser de material cerámico o plástico. Su distribución puede ser irregular (filtro anaerobio propiamente dicho, con flujo ascendente, Figura II-40b) donde las bacterias se encuentran atrapadas en los intersticios, o regular y orientado verticalmente (lecho fijo con flujo descendente, Figura II-40a).

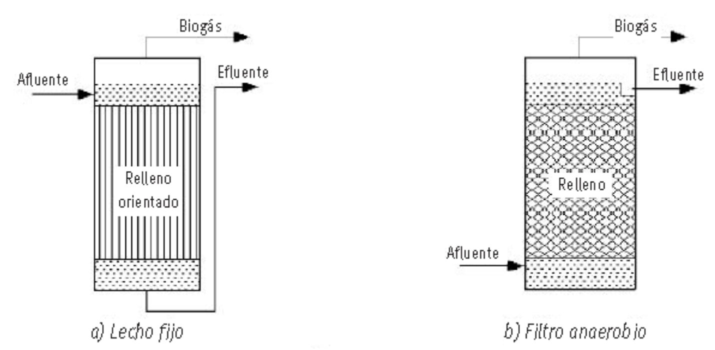


Figura II-40. Reactores con retención interior de biomasa. a) Lecho fijo; b) Filtro anaerobio (Fuente: IDAE 2007)

4.3.2.2.2 Reactores de lecho de lodos y lecho fluidizado

El sistema de lecho de lodos (Figura II-41c) favorece la floculación o agregación de bacterias, que formarán gránulos, y que por sedimentación se mantendrán en el interior del reactor. El diseño más común es el *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) y es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales de la industria agroalimentaria.

En el sistema de lecho fluidizado, las bacterias se encuentran fijadas formando una biopelícula sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante un flujo ascendente (Figura II-41d). Para mantener el caudal adecuado de este flujo, se recurre a la recirculación.

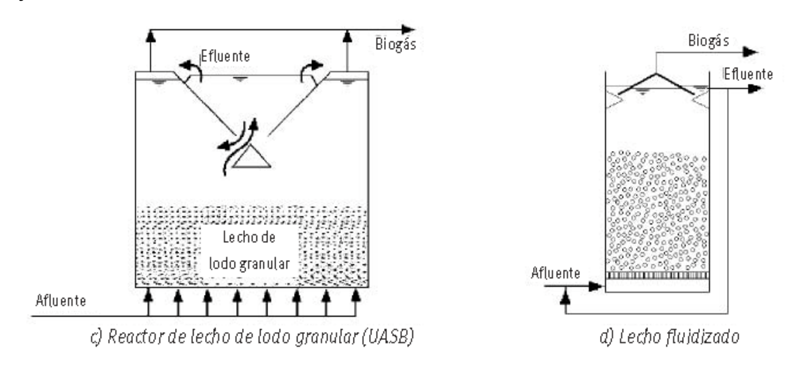


Figura II-41. Reactores con retención interior de biomasa. c) Reactor de lecho de lodo granular (UASB); d) Lecho fluidizado (Fuente: IDAE 2007)

4.3.2.3 Otros sistemas

4.3.2.3.1 Sistemas de dos etapas

Consiste en un primer reactor que posee un tiempo elevado de retención donde se favorece la hidrólisis, seguido de un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Se ha aplicado con éxito para tratar residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis: frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc.

4.3.2.3.2 Sistemas de dos fases

El objetivo de este sistema es conseguir un tiempo de retención global inferior al que correspondería a un único reactor de mezcla completa. Para conseguirlo se mantienen dos reacciones en serie, en los que se realizan respectivamente las fases de acidogénesis y metanogénesis. Este tipo de sistema se ha aplicado con éxito en la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos.

4.3.3 Obtención de biogás a partir de vertederos urbanos de RSU y de ARU

Los **vertederos de RSU** (Residuos Sólidos Urbanos, ver capítulo 5 del bloque de materias primas) generan dos tipos de residuos: por un lado están los lixiviados, que son efluentes que contienen cantidades de materia orgánica muy alta y que provienen tanto de las aguas de percolación como de las aguas de generación, y por otro lado el biogás, como resultado de las reacciones químicas que se producen entre los distintos sólidos enterrados en el vertedero. En condiciones óptimas, una tonelada de desechos biodegradables puede producir entre 200 y 400 m^3 de gas de vertedero.

El biogás generado mediante una conversión espontánea de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), contiene entre un 45% y un 65% de metano. Si éste no se aprovecha, combustiona y sale espontáneamente a la superficie en forma de antorcha. Una alternativa es construir una serie de pozos de captación o sistema de tuberías que canalizan el gas de vertedero para ser aprovechado como combustible de un motor de combustión interna, que acciona un generador trifásico para producción de electricidad. La viabilidad del aprovechamiento energético vendrá dada por la cantidad de gas generado. Hay que tener en cuenta que la vida útil de un vertedero es limitada, y la producción de biogás varía a lo largo de la misma.

Otra posibilidad de aprovechamiento energético de los FORSU, que no requieren esperar a tener sellado el vertedero, son los procesos de digestión anaerobia, en los que la producción de biogás se produce en un reactor anaerobio o digestor en vez de en el propio vertedero. Esta opción permite la codigestión con otro tipo de residuos orgánicos: ganaderos, de industrias agroalimentarias, glicerinas, etc.



Figura II-42. a) Desgasificador de vertedero RSU; b) EDAR (Fuentes: http://www.biometsa.es y http://www.solarsostenible.org)

En el caso de las **EDAR** (Estación Depuradora de Aguas Residuales), contamos con dos líneas separadas de tratamiento: la línea de aguas y la línea de fangos, y cada una de ellas cuenta con diferentes etapas y procesos. Describiremos aquí las etapas de las que consta la línea de fangos por ser a partir de la que se obtiene el biogás:

- **Espesamiento:** Los fangos poseen una gran cantidad de humedad (95%) por lo que ocupan un volumen elevado. Por ello, en primer lugar se procede a concentrarlos en los espesadores, consiguiendo una reducción de volumen de hasta 1/5 respecto al volumen inicial.
- **Digestión anaerobia:** Los fangos se fermentan de forma controlada para producir biogás por un lado, y para eliminar patógenos por el otro. Los fangos se introducen en digestores donde se producen las reacciones necesarias de una digestión anaerobia (ver punto 3.1 de este capítulo). Generalmente, parte de este biogás es utilizado como combustible para las calderas de los propios digestores, y el sobrante, o se vende, o se quema en antorchas.
- **Deshidratación:** Los fangos líquidos que salen del digestor son tratados posteriormente para extraerles de nuevo la humedad. Para ello, existen plantas de secado térmico de fangos especializadas que valorizan este residuo, pudiendo ser utilizado como fertilizante.

4.4 BIOHIDRÓGENO

El hidrógeno, es el elemento más ligero que existe, y en condiciones atmosféricas es un gas incoloro, inodoro y no es tóxico. Es el elemento más abundante, pero en nuestro planeta no se encuentra en estado libre, sino que se presenta unido al carbono formando compuestos orgánicos, o formando agua unido con el oxígeno, por tanto no es una fuente de energía primaria sino un portador de energía o “vector energético”. Sin embargo, y a pesar de su altísimo PCI (120 MJ/kg), hasta el momento, y probablemente durante al menos unos años más, los inconvenientes de elaboración (ej. elevados costes de producción y, dificultad y elevados costes de manipulación) han

sido claramente superiores a sus ventajas, por lo que su utilización en forma de combustible es prácticamente nula.

Gracias a su abundancia, el hidrógeno puede obtenerse a partir de variadas materias primas que pueden clasificarse en:

- Recursos fósiles: derivados del petróleo, gas natural ó carbón.
- Recursos renovables: agua y biomasa

Y para su producción se utilizan diferentes tipos de tecnologías:

- Procesos de conversión química: reformado, gasificación y pirólisis
- Procesos electrolíticos: electrolisis
- Procesos termólicos: termólisis directa y por ciclos termoquímicos
- Procesos biológicos: fermentación y digestión anaerobia
- Procesos fotónicos: fotoelectrólisis, fotobiólisis y fotocatálisis

El interés de obtener hidrógeno a partir de biomasa radica, por un lado, en que el proceso de producción posee un balance de CO_2 neutro, es decir, que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el mismo CO_2 que se libera durante la producción. Por otro lado, la biomasa es un recurso renovable y sostenible, siempre que su consumo no sea mayor que la capacidad de regeneración natural.

Existen diversos procesos (Figura II-43), que permiten obtener hidrógeno a partir de biomasa. Los procesos biológicos son, generalmente, más lentos y costosos que los termoquímicos.

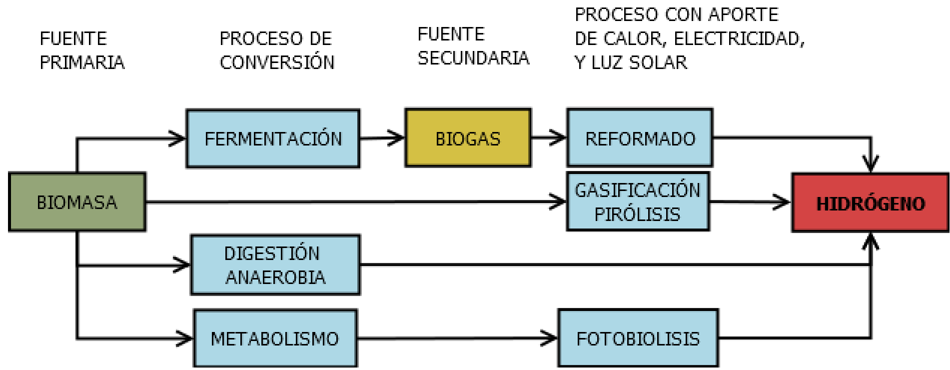


Figura II-43. Procesos de producción de hidrógeno a partir de biomasa (Fuente: Elaboración propia)

4.4.1 Reformado

Es uno de los procedimientos más utilizados y a partir de él se obtiene casi un 95% de la producción mundial. En este proceso el metano obtenido a partir del biogás de una fermentación, reacciona con vapor de agua (reformado con vapor de agua: $CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$), con oxígeno (reformado por oxidación parcial: $CH_4 + ½\ O_2 \rightarrow 2H_2 + CO$),

una combinación de ambas (reformado autotérmico), o en seco (reformado con CO_2: $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO$).

El proceso más empleado a escala industrial es el reformado con vapor ("*Steam reforming*") que se lleva a cabo a través de dos reacciones consecutivas: reacción de "*Water Gas Shift*" entre el agua y el metano, y una posterior purificación mediante una metodología denominada "*Pressure Swing Adsorption*". La primera reacción tiene lugar a una Tª de entre 800 y 900ºC a una presión de 25 bar, obteniéndose un gas rico en carbono e hidrógeno y una cantidad menor de monóxido de carbono. Posteriormente, la eliminación del CO se realiza mediante una serie de reacciones de cambio de Tª (400ºC a 200ºC respectivamente), produciéndose una mezcla gaseosa de H_2, CO_2, H_2O, un poco de CO y CH_4. Finalmente se efectúa una purificación, que permite obtener hidrógeno puro al 99,99%, cuyo contenido energético es mayor que el del gas del que procede.

Debido a las limitaciones que presenta el reformado con vapor (elevado consumo energético, con las consecuentes emisiones de CO_2 y la inadecuada relación H_2/CO que se obtiene), la investigación en este campo se centra en mejoras del propio proceso de reformado, así como en el desarrollo de procesos alternativos para la producción de gas de síntesis y de hidrógeno, como la oxidación parcial y el reformado con CO_2.

La oxidación parcial presenta como ventaja ser una reacción exotérmica por lo que no requiere de un aporte de energía externa durante la operación. Esta ventaja se contrarresta con la producción de una cantidad de hidrógeno menor. Por otro lado, el reformado de metano con CO_2 (reacción endotérmica favorecida por temperaturas superiores a 800ºC y bajas presiones) se considera actualmente una alternativa prometedora, ya que permite convertir dos gases de efecto invernadero, especialmente CO_2, en materia prima útil y valiosa.

4.4.2 Gasificación y Pirólisis

El proceso de producción de H_2 a partir de biomasa mediante gasificación y pirolisis es similar a aquel que utiliza el carbón como materia prima, aunque la escala de operación empleada es menor debido, fundamentalmente, al escaso contenido energético que presenta la biomasa (un 6% de H_2 en peso de media). La metodología se fundamenta en una oxidación parcial de la biomasa en presencia de oxígeno (gasificación) o en ausencia del mismo (pirolisis) y vapor de agua, y cuya manipulación posterior consigue generar hidrógeno de gran pureza. Así, el gas combustible obtenido se compone principalmente de monóxido de carbono (CO) y de hidrógeno (H_2), conservando la mayor parte de la energía del combustible inicial.

La formación de alquitranes es uno de los problemas técnicos con los que se encuentra en estos momentos la metodología de la gasificación de la biomasa, ya que su condensación en las zonas frías de los equipos genera problemas de taponamiento y ensuciamiento, provocando las paradas indeseadas de la instalación. La cantidad de subproducto generado depende de las características de la biomasa empleada (tipo,

humedad, tamaño de partícula…) y de las condiciones de la gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas, velocidad de calentamiento de la biomasa, etc.).





Figura II-44. Planta piloto de captura de CO_2 y producción de H_2, situada en la central de GICC de Puertollano y estación de producción y suministro de hidrógeno para automóviles. (Fuentes: Proyectos ELCOGAS http://www.fundacionentorno.org y PSE HÉRCULES http://www.proyectohercules.es)

Este tipo de técnica no es adecuada para plantas de producción descentralizada, debido a su alto coste y a que la captura y almacenamiento de CO_2 en sistemas pequeños sería difícil y caro. Sin embargo, la producción de hidrógeno en plantas tipo GICC (Gasificación Integrada en Ciclo Combinado, Figura II-44) es una buena opción, ya que se obtienen una mayor eficiencia en la co-producción de electricidad e hidrógeno y se mejoran las posibilidades de captura del CO_2 .

4.4.3 Digestión anaerobia

Ver punto 3.1 de este capítulo.

4.4.4 Biofotolisis

La producción biológica de hidrógeno es un proceso llevado a cabo por microorganismos muy variados, desde procariotas a eucariotas y desde organismos fotolitótrofos a quimioorganótrofos. En los organismos fotosintéticos, las enzimas implicadas en la producción de hidrógeno son la hidrogenasa y la nitrogenasa.

La reacción de generación de hidrógeno basada en la **hidrogenasa** puede producir hidrógeno tanto en condiciones de iluminación como en la oscuridad. En el primer caso, la producción está asociada a la fijación de CO_2 atmosférico y una posterior producción de hidrógeno en condiciones anaerobias y en oscuridad. Sin embargo, esta metodología tiene como limitación la inhibición de la hidrogenasa por la acción del oxígeno, generado por el propio metabolismo. En el segundo caso, determinadas algas (ej. del género *Scenedesmus*), son capaces de producir hidrógeno sin iluminación, lo que permite una producción continua de hidrógeno ya que, al no generarse oxígeno, no se inhibe la enzima hidrogenasa.

Por otro lado, la ruta preferente de producción de hidrógeno por cianobacterias es la utilización de la enzima **nitrogenasa**, específica de bacterias. Esta enzima tiene la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico transformándolo en amonio en un proceso en el que también se produce hidrógeno. Al igual que le sucedía a la hidrogenasa, la nitrogenasa es muy sensible a la presencia de oxígeno, por lo que las cianobacterias deben recurrir a estrategias que logran evitar una inhibición.

Existen otros grupos de bacterias fotosintéticas anaerobias capaces de realizar procesos de biofotólisis utilizando compuestos orgánicos como fuente de carbono. Son eubacterias fotosintéticas (bacterias rojas y verdes no del azufre) que pueden obtener elevadas producciones de hidrógeno. Las más estudiadas pertenecen al género *Rhodobacter* (Figura II-45b).



Figura II-45. a) Producción biofotolítica de hidrógeno a partir del alga Chlamydomonas reinhardtii; b) Rhodobacter shaeroides (Fuentes: http://www.uni-bielefeld.de y ***http://classic.the-scientist.com)***

4.4.5 Celdas de combustible microbiana

La conversión de energía química en eléctrica es posible gracias a ciertos dispositivos denominados células o pilas de combustible, donde la electricidad se obtiene a partir de una fuente externa de combustible química, que suele ser hidrógeno o etanol. Una variante de esta célula es la célula de combustible microbiana (*Microbial Fuel Cells, MFC*).

En las MFC se utilizan bacterias que oxidan la materia orgánica liberando CO_2 y protones dentro de la disolución y electrones en el ánodo. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo a través de un material conductor que contiene una resistencia. Las cámaras que albergan estos electrodos, la anódica (anaerobia) y la catódica (aerobia), están comunicadas por una membrana de intercambio catiónico que permite el paso de protones. De esta forma, los protones generados en la oxidación de la materia orgánica se combinan con oxígeno y con los electrones que llegan al cátodo para formar agua (Figura II-46).

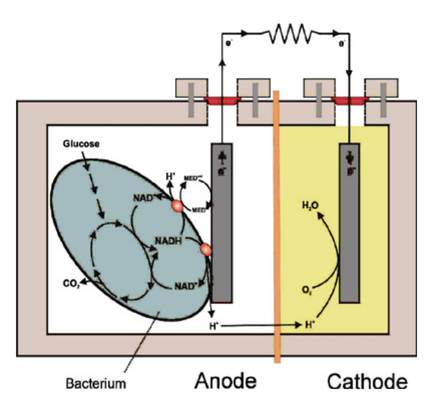


Figura II-46. Funcionamiento de una celda de combustible microbiana (Fuente: http://www.microbialfuelcell.org)

Los análisis de comunidades microbianas asociadas a los ánodos de las MFC muestran una gran diversidad de géneros bacterianos dependiendo de la naturaleza del inóculo, del combustible y del tipo de MFC utilizada. Pero en general, se pueden distinguir dos tipos de bacterias electrogénicas: las que producen sus propios mediadores redox, que son secretados al medio y reaccionan con el electrodo, y las que interaccionan de forma directa con el electrodo sin mediador soluble. Las principales representantes del primer grupo pertenecen al género *Shewanella* y las del segundo grupo pertenecen al género *Geobacter* (Figura II-47a).

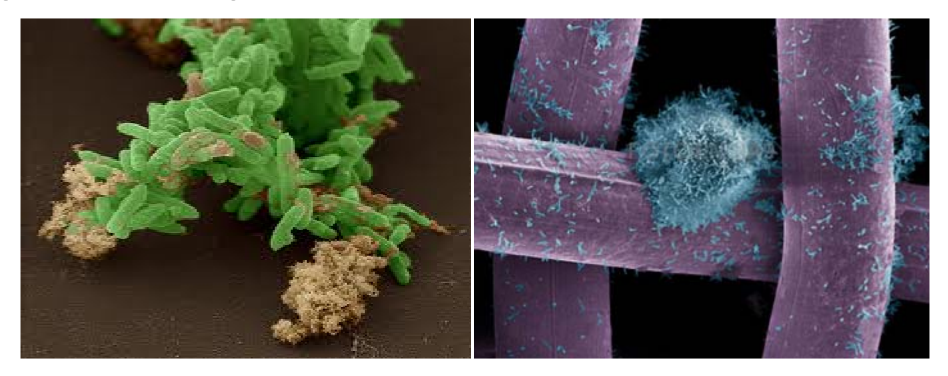


Figura II-47. a) Bacteria Geobacter, b) Detalle de una bacteria generando energía en una MFC (Fuente: www.geobacter.org y http://www.fotciencia.es)

4.5 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Bermúdez JJ, Cánovas M, Manjón A, Iborra JL, Howell JA. 1988. La digestión anaerobia. Universidad de Murcia. Secretariado de Publicaciones. Murcia. 75 pp. ISBN: 84-7684-102-7.

Bull D. 2008. Performance improvements to a Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB) biomass gasifier for combined heat and power plants. Thesis. University of Canterbury.

Esteve-Núñez A. 2008. Bacterias productoras de electricidad. Boletín informativo de la Sociedad Española de Microbiología (SEM). Junio 2008, 34-39.

Fernández JM. 2010. Guía completa de la biomasa y los biocombustibles. A. Madrid Vicente ed. Madrid. ISBN 987-84-96709-62-1.

Fidalgo B. 2010. Reformado de metano con CO_2 asistido con microondas. Tesis doctoral. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

Fierro JLG, Gómez L. Peña MA. 2000. El Hidrógeno: un vector energético no contaminante para automoción. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC. Canto Blanco, Madrid, España. 163 pp.

González García-Conde A. 2004. Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

IDAE. 2007. Biomasa. Digestores anaerobios. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. ISBN-13: 978-84-96680-21-0. Madrid.

IDAE. 2007. Biomasa: Gasificación. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. ISBN-13: 978-84-96680-20-3. Madrid.

PSE PROBIOAGAS. 2009. Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales. Proyecto Singular Estratégico PROBIOGAS. Varios autores.

Treviño M. 2003. Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC. ELCOGAS, S.A. Club Español de la Energía. Spain.

Valero JM, Egizabal A, Arrillaga I, Belsue M. 2004. Producción biológica de hidrógeno a partir de residuos. Ingeniería química, 414:188-192.

BLOQUE III. SOSTENIBILIDAD



BLOQUE III. SOSTENIBILIDAD

1 CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS SOBRE EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA EN UN MARCO DE DESARROLLO SOSTENIBLE

1.1 INTRODUCCIÓN

Según "**La Carta de las Ciudades Europeas hacia la Sostenibilidad**", conocida como Carta de Aalborg (1994), la sostenibilidad ambiental significa preservar el capital natural. Requiere que nuestro consumo de recursos materiales, hídricos y energéticos renovables no supere la capacidad de los sistemas naturales para reponerlos, y que la velocidad a la que consumimos recursos no renovables no supere el ritmo de sustitución de los recursos renovables duraderos. La sostenibilidad ambiental significa, asimismo, que el ritmo de emisión de contaminantes no supere la capacidad del aire, del agua y del suelo de absorberlos y procesarlos. La sostenibilidad ambiental implica, además, el mantenimiento de la diversidad biológica, la salud pública, y la calidad del aire, el agua y el suelo a niveles suficientes para preservar la vida y el bienestar humanos, así como la flora y la fauna, para siempre. En este tema se presentan conceptos y fundamentos sobre desarrollo sostenible, bioenergía y sus impactos ambientales más importantes, y los criterios generales para un aprovechamiento de la biomasa sostenible.

1.2 MODELO ENERGÉTICO ACTUAL

El término energía hace referencia a una fuerza de acción o fuerza trabajando, y el concepto está relacionado con la idea de una capacidad para obrar, transformar o poner en movimiento. Todos los organismos incluyendo al humano, necesitan energía para sus actividades. Las fuentes de energía primaria (Tabla III-1) son aquellas que se encuentran de forma espontánea en la naturaleza y que se pueden utilizar directamente, o bien se emplean para producir, calor, electricidad o hidrógeno (fuentes secundarias de energía).



Figura III-1. Energías fósiles (ej. extracción de petróleo) y energías renovables

Si tenemos en cuenta el ritmo de consumo de energía que el ser humano requiere para vivir, podemos clasificarlas en:

- **Renovables:** son aquellas que pueden utilizarse de manera continuada para producir energía, bien porque se regeneran fácilmente (ej. biomasa) o porque son una fuente inagotable (energía solar).
- **No renovables:** una vez utilizadas tardan mucho tiempo en regenerarse (ej. petróleo).

Buena parte de la energía que se consume en la actualidad corresponde a recursos no renovables. Los combustibles fósiles han permitido un espectacular desarrollo de la sociedad del siglo XX. Y lo siguen sosteniendo, ya que son el motor de la energía que nutre a la industria, comunicaciones y transporte.

Tabla III-1. Fuentes de energía primaria (Fuente:http://es.wikipedia.org)

FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA		
Fuentes No-renovables	Energías fósiles	Crudo (petróleo)
		Carbón
		Gas natural
	Energías minerales	Uranio natural
Fuentes Renovables		Energía solar
		Energía eólica
		Energía mareomotriz
		Biomasa
		Energía geotérmica

El desarrollo económico y el uso de energías fósiles también han provocado varias situaciones a nivel global:

- **Aumento de la concentración de CO_2 y otros gases de efecto invernadero** en la atmósfera, contribuyendo a la aceleración del cambio climático.
- **Otros problemas medioambientales** con efectos negativos en la salud humana.
- Un **reparto desigual de los recursos** que son consumidos y de los beneficios adquiridos.
- **Sistemas energéticos dependientes de un recurso finito**, con baja tasa de renovación, muy localizado geográficamente y con variación temporal en la disponibilidad, y que en la mayoría de los casos tiene que ser importado desde otro país, es decir, no es una fuente energética segura.

1.2.1 Potencial de la energía renovable de la biomasa

Uno de los grandes potenciales de la energía renovable de la biomasa o bioenergía es que puede desplazar las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de combustibles fósiles, y por tanto ayudar a mitigar el cambio climático. Puede suponer una fuente de energía alternativa para incrementar la seguridad energética. Además, puede resolver el problema del tratamiento de los residuos en el

caso de la biomasa residual. La gestión del bosque mejora la calidad de las masas forestales y proporciona residuos forestales que se podrían aprovechar energéticamente. Los cultivos agrícolas, y la industria maderera y agroalimentaria producen residuos orgánicos que podrían revalorizarse y emplearse para la producción y diversificación de energía. La utilización energética de la biomasa puede generar ingresos y la creación de puestos de trabajo, especialmente en el medio rural. Otra gran ventaja de la biomasa es que puede ser almacenada y utilizada cuando se necesita. No obstante, para poder ser viable es necesario disponer de una fuente de biomasa cercana a precios razonables, y tener unos consumos energéticos suficientes y la tecnología adecuada para que la instalación sea rentable. En cuanto a los inconvenientes, hay que destacar que la biomasa rinde menos que los combustibles fósiles (por término medio, un litro de gasolina equivale a tres kilos de biomasa), y se necesitan más recursos, y sistemas más complejos y costosos de almacenamiento y manejo, aunque se están mejorando. Asimismo, los canales de distribución de la biomasa no están tan desarrollados como los de los combustibles fósiles, aunque sus defensores aseguran que las principales barreras no son de carácter tecnológico, sino de mentalidad y de capacidad organizativa.

1.3 CAMBIO CLIMÁTICO, BIOENERGÍA Y DESARROLLO SOSTENIBLE

La bioenergía está inmersa en rutas complejas de sistemas globales de biomasa natural que se utiliza para la producción de comida, pienso, fibra y productos forestales; y está en rutas complejas de sistemas de manejo de residuos y desechos; y presente en el día a día de la gente pobre de los países en vías de desarrollo. La bioenergía tiene interacciones ambientales y sociales complejas, incluyendo la retroalimentación con el cambio climático. El cambio climático y la crisis energética han impulsado en los últimos años la utilización de biomasa como fuente de energía. Esto ha ido acompañado de una creciente demanda de verificación de la sostenibilidad de la biomasa**,** motivada por la competencia por los usos del suelo, el impacto potencial para la producción y precio de los alimentos, así como la preocupación de que una potencial intensificación de la producción agrícola y de la gestión forestal, pueda suponer un riesgo añadido para la conservación de la biodiversidad.

El concepto de desarrollo sostenible apareció por primera vez en el informe Founex en 1972, y fue formulado de nuevo por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo en 1987 en el informe más conocido como *Informe Brundtland*, el cual fue el eje de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, organizada en 1992 en Río de Janeiro (más conocida como Cumbre de la Tierra de 1992), y se ha incorporado a prácticamente todos los programas de acción medioambiental desde entonces. En el informe Brundtland se define el desarrollo sostenible como el desarrollo que asegura las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras para asegurar sus necesidades propias. El concepto de desarrollo sostenible hay que entenderlo como las relaciones entre la sociedad humana y la naturaleza. Tradicionalmente, se ha

enmarcado en un modelo de tres pilares: Economía, Ecología y Sociedad, permitiendo una categorización sistemática de objetivos de desarrollo (Figura III-2).

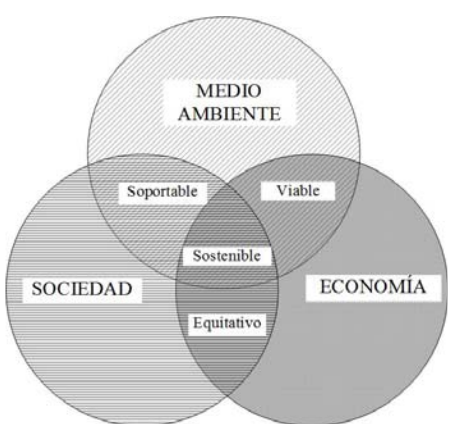


Figura III-2. Modelo de los tres pilares fundamentales del desarrollo sostenible

La Asamblea General de las Naciones Unidas tiene como objetivos promover la integración de los tres pilares del desarrollo sostenible (desarrollo social, económico y protección ambiental), entendiendo que son interdependientes y que se refuerzan mutuamente. Este punto de vista permite entender que existen una serie de acciones que podrían contribuir a conseguir los tres objetivos simultáneamente, por ejemplo la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables. En la Tabla III-2 se indican los aspectos más importantes de los tres pilares del desarrollo sostenible, propuestos por la *Global Bioenergy Partnership* (2007).

Tabla III-2. Aspectos más importantes en los que se basa el desarrollo sostenible del aprovechamiento energético de la biomasa (GPEP 2007)

MEDIO AMBIENTE	SOCIEDAD	ECONOMÍA
Emisiones de gases de efecto invernadero (Greenhouse gases, GHG)	Precio y provisión de la cesta de alimentación nacional	Disponibilidad del recurso, eficiencia de uso en producción, conversión y distribución de bioenergía
Capacidad productiva del suelo y los ecosistemas	Acceso al suelo, agua y otros recursos naturales	Desarrollo económico
Calidad del aire	Condiciones de trabajo	Viabilidad económica y competitividad de la bioenergía
Disponibilidad de agua	Desarrollo rural y social	Acceso a la tecnología y capacidades tecnológicas
Calidad y eficiencia de uso del agua	Acceso a la energía	Seguridad energética/ Diversificación de fuentes/Abastecimiento de energía
Diversidad biológica	Salud humana y seguridad	Seguridad energética/ Infraestructuras y logística para su distribución y uso
Cambio de uso del suelo		

1.3.1 Marco de sostenibilidad y estándares

Existen muchos principios, criterios e indicadores para definir un marco de desarrollo sostenible debido a la complejidad que implica poner en marcha un concepto así. El concepto de desarrollo sostenible se orienta a día de hoy en el marco de dos paradigmas de sostenibilidad; una sostenibilidad débil y una sostenibilidad fuerte. En el caso del paradigma de **sostenibilidad débil**, se basa en la idea de que el capital natural puede ser sustituido con el capital hecho por el hombre sin comprometer el bienestar futuro. Mientras que el concepto de sostenibilidad débil asume que el sistema económico se adapta flexiblemente a la disponibilidad variable de formas de capital (recursos), una **sostenibilidad fuerte** comienza con una perspectiva ecológica con la intención de proponer barreras para salvaguardar las rutas socio-económicas.

Por otro lado, el desarrollo sostenible ha ido de la mano de la lucha contra el cambio climático desde la conferencia de la Cumbre de la Tierra de 1992, en la que se buscaba estabilizar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero en niveles considerados como seguros. Uno de los principales logros de la conferencia fue el acuerdo sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que más tarde llevaría a la creación del Protocolo de Kioto sobre cambio climático. El Protocolo de Kioto, es uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el cambio climático, y contiene los compromisos asumidos por los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global. Es por esto que actualmente los gobiernos están haciendo hincapié en la importancia de asegurar una suficiente mitigación del cambio climático, y evitar efectos negativos inaceptables, así como en implementar instrumentos de regulación que aseguren un desarrollo sostenible. Por ejemplo, la Directiva Europea de Energías Renovables (DIR 2009/28/CE) proporciona requerimientos obligatorios de sostenibilidad para los combustibles líquidos empleados en transporte. La proliferación de métodos estándares y de certificación es relativamente reciente, aunque dentro de la Unión Europea ya hay un número de iniciativas importantes sobre certificación para garantizar prácticas sostenibles de cultivos energéticos y producción de combustibles. Por ejemplo el ISCC (*International Sustainability and Carbon Certification*). Muchos de los organismos implicados concluyen que para que un sistema de certificación sea eficiente, es necesario más armonización, disponibilidad de datos reales y la unión de los indicadores a diferentes escalas (nivel local, regional, nacional e internacional).

1.3.2 Indicadores de sostenibilidad

El contexto político de la bioenergía, y particularmente el de los biocombustibles, ha cambiado rápida y dramáticamente en los últimos años debido al debate generado sobre la alimentación *versus* combustibles. Este debate y otros conflictos han supuesto un gran avance para el desarrollo y la implementación de marcos y criterios de sostenibilidad. Muchos de estos conflictos pueden reducirse, e incluso ser evitados, promoviendo sinergias en el sector del manejo de los recursos naturales, y sectores

agrícola y ganadero, como parte de una buena gobernanza (buena gestión) del uso del suelo, que incrementa el desarrollo rural y puede contribuir a la eliminación de la pobreza y a un acceso seguro a la energía.

Para las tecnologías de las energías renovables hay muchos indicadores cuantitativos como el precio de la electricidad generada, las emisiones de gases invernadero durante todo el ciclo de vida de la tecnología (LCA, *Life Cycle Assessment*), la disponibilidad de recursos renovables, la eficiencia de conversión de energía, necesidades de territorio y consumo de agua. Existen otros indicadores de sostenibilidad débil o baja, como el índice de riqueza económica sostenible (ISEW, *Index of Sustainable Economic Welfare*), o el indicador de progreso genuino (GPI, *Genuine Progress Indicator*), y otros más consistentes con una sostenibilidad fuerte o alta, que incluyen la capacidad de carga, la huella ecológica y la resiliencia. La diversidad y naturaleza de la información disponible actualmente sobre los impactos de la bioenergía, hace difícil la elección del mejor indicador. Son numerosas las evaluaciones de todo el ciclo de vida del producto (LCA), fundamentalmente de biocombustibles; y se centran en las emisiones de gases de efecto invernadero para los biocombustibles de primera generación (a partir de cultivos energéticos). Otros indicadores muy empleados son la huella ecológica del consumo de agua, uso del suelo o demanda de tierra y emisiones de CO_2.

Tabla III-3. Indicadores de sostenibilidad para el aprovechamiento de la biomasa (GBP 2007)

AMBIENTAL	SOCIAL	ECONOMÍA
Ciclo de vida de las emisiones de GHG	Transformación y cambio de propiedad del suelo para la producir bioenergía	Productividad
Calidad del suelo	Precio y abastecimiento de la cesta nacional de alimentación	Balance energético neto
Niveles de cosecha del recurso leñoso	Cambio en los ingresos	Valor bruto añadido
Emisiones de gases contaminantes, incluyendo tóxicos contaminantes del aire	Trabajo en el sector de la bioenergía	Cambio en consumo de combustibles fósiles y uso tradicional de biomasa
Uso del agua y eficiencia	Cambio en el tiempo no pagado que emplean mujeres y niños recolectando la biomasa	Formación y reciclaje de la clase trabajadora
Calidad del agua	Cambio en la mortalidad y enfermedades atribuidas al humo en espacios interiores	Diversidad energética
Diversidad biológica en el paisaje	Incidencia de daños, enfermedades y fatalidades	Infraestructuras y logística para distribuir bioenergía
Uso del suelo y cambio de uso en la producción de materia prima para bioenergía	-	Capacidad de uso y flexibilidad de la bioenergía

En la Tabla III-3 aparecen los indicadores de sostenibilidad propuestos por la GBP (2007). Otros indicadores más generales, pero que son aspectos fundamentales para un aprovechamiento energético sostenible (y que pueden englobar a otros indicadores particulares), son los propuestos por el grupo de expertos sobre cambio climático, más conocido como Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático que son:

- **El acceso a la energía**
- **Seguridad energética**
- **Desarrollo social y económico**
- **Mitigación del cambio climático** mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y reducción de contaminantes que afectan a la salud humana y a la calidad del medio ambiente

1.4 IMPACTOS AMBIENTALES DEL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

Ya hemos dicho que el uso de la bioenergía puede tener impactos positivos y negativos. Estos impactos se producen en toda la cadena de producción de la bioenergía (producción, transformación, distribución y uso), aunque los impactos más negativos se producen durante la etapa de producción y en todo lo relacionado con la producción agrícola. A continuación se describen los impactos ambientales más importantes de la bioenergía relacionados con la mitigación del cambio climático y la salud ambiental y humana.

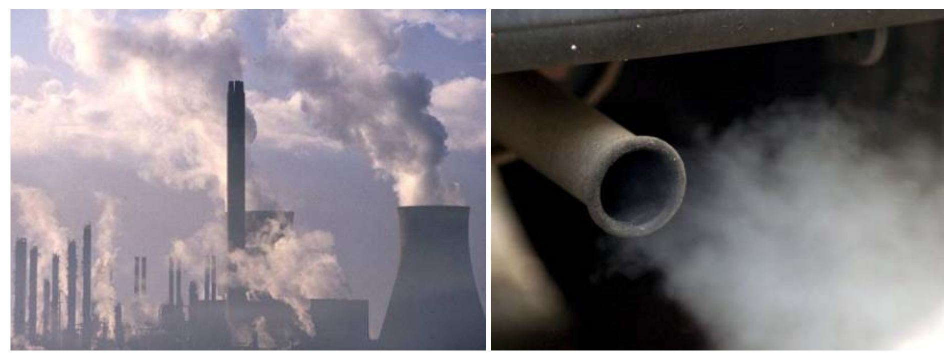


Figura III-3. Emisiones de CO_2

1.4.1 Cambio climático

Para cumplir con las políticas medioambientales establecidas para la mitigación del cambio climático (Protocolo de Kioto), el balance neto de CO_2 con el uso de la energía de la biomasa debería ser neutro. Sin embargo, el análisis de las emisiones a lo largo de la cadena de producción de la bioenergía, indica que existe una gran divergencia entre el balance de carbono según las tecnologías utilizadas, la ubicación y los sistemas de producción, incluyendo algunos que pueden crear aun más emisiones que el combustible fósil. Este es el caso del uso de la biomasa en procesos industriales, donde

aparentemente no hay un balance neutro, ya que se emplean otras fuentes de energía (ej. para la conversión de la tierra, mecanización, uso de fertilizantes y pesticidas durante la producción de la materia prima, uso de energía no renovable durante el procesamiento y el transporte). Sin embargo, los sistemas que usan desechos orgánicos y residuos de la agricultura, de bosques y/o desechos orgánicos urbanos o industriales, o el cultivo de plantas perennes en tierras degradadas, ofrecen un potencial de ahorro de emisiones de gas de efecto invernadero mucho mayor.

1.4.2 Cambio de uso del suelo

A pesar de que la mayoría de las tecnologías requieren un suelo para desarrollarse, existen pocos trabajos que aporten estimaciones del uso del suelo durante todo el ciclo de vida de la tecnología. La producción y el uso de la bioenergía influyen en las emisiones de gases invernadero relacionadas con cambios en los almacenes de carbono en la biosfera (ej. turberas), a menudo causados por el cambio de uso del suelo. Son también factores importantes la extensión y el tiempo de reversión de las tierras cultivadas, cuando el uso para la producción de bioenergía termina, y cómo sean tratados los futuros impactos del cambio climático relativos a los impactos presentes. El alcance del efecto del cambio de uso del suelo causado por el crecimiento de la bioenergía dependerá también de la seguridad de tenencia de la tierra, la integración entre los sistemas de producción de alimentos y de energía, y el potencial para la intensificación. Algunas mejoras en el rendimiento de algunas tierras son debidas principalmente a la respuesta dada al incremento de precios, especialmente a través del incremento del uso de insumos y mejores prácticas de gerencia. Sin embargo, las tecnologías para la producción de materia prima para la bioenergía aún se encuentran en fase de desarrollo, indicando que en el corto plazo la gran parte del incremento de la producción posiblemente derivaría de la expansión de zonas agrícolas (Figura III-4a).

1.4.3 Biodiversidad y los ecosistemas naturales

La bioenergía puede influir en la fragmentación de hábitats, en la degradación de ecosistemas y la perturbación de ciertas especies, por ejemplo mediante la modificación del medio ambiente por la creación de infraestructuras o por los métodos de cultivo y de cosecha. También se puede producir el deterioro de hábitats naturales debido a la contaminación del aire o el agua, con eutrofización y emisión de pesticidas en los hábitats acuáticos. Si áreas de gran calidad (e.g bosques naturales) u otros ecosistemas ricos en biodiversidad son convertidos en zonas agrícolas para la producción de materia prima, la pérdida de biodiversidad puede ser significativa aunque la conversión del suelo sea temporal. Un aspecto negativo adicional es la posible introducción de especies no autóctonas invasivas para la producción de biocombustibles. Existen temores a que si se introducen estos tipos de cultivos, se conviertan en invasivos, desplacen a la especies autóctonas y disminuya la biodiversidad. Por ejemplo, *Jatropha curcas* es considerada como invasiva en muchos

países de América del sur e India. Lo mismo ocurre con *Miscanthus, Arundo donax*, etc., invasivas en USA, o tabaco moruno (Figura III-4b), jatrofa y sorgo en España.

La biodiversidad agrícola también podría verse afectada por prácticas de monocultivo a gran escala y por la introducción de materiales genéticamente modificados. Debido a la preocupación sobre hibridación, polinización cruzada, resistencia a plagas e interrupción de las funciones de los ecosistemas, en muchas regiones se está limitando el uso de cultivos modificados genéticamente. Pero, con un manejo adecuado, los efectos positivos de la bioenergía pueden incluir biodiversidad mejorada, incremento de fijación de carbono en el suelo, y aumento de la productividad del suelo; puede reducir los movimientos de tierra superficiales, e inundaciones locales, puede reducir la erosión eólica e hídrica y reducir el volumen de sedimentos y nutrientes transportados en los sistemas fluviales. En los sistemas forestales, la bioenergía puede mejorar el crecimiento y la productividad, mejorar las condiciones del sitio para replantar y reducir el riesgo de fuego.



Figura III-4. a) Ruta de la soja en el Noroeste argentino y b) la invasora Nicotiana glauca (Fuentes: http://www.greenpeace.org y http://www.energias-renovables.com)

1.4.4 Agua

El agua es un recurso crítico y altamente localizado con usos múltiples y competidores entre sí, incluyendo a la energía. El estado y la cantidad de los recursos hídricos en una localidad específica, influirá en la selección, el diseño y puesta en marcha de un tipo de tecnología energética; los impactos, por lo tanto, también variarán geográficamente y temporalmente. El uso de agua para la producción de energía puede ser alto en algunas tecnologías, particularmente en la extracción del combustible y la producción de materia prima a partir de biomasa; por eso, sin un manejo adecuado del recurso, la producción de bioenergía podría incrementar la competición por el agua en zonas críticas. Hay que tener en cuenta el balance de energía útil, es decir la cantidad de agua que hay que incorporar en ciertos procesos. Sin embargo, la proporción de agua dulce para riego entre el agua total consumida varía considerablemente, y la relación entre los procesos hidrológicos y la vegetación a una escala de paisaje es muy compleja. De hecho, algunos sistemas de producción de materia prima podrían conducir el uso del suelo hacia una productividad de agua mayor y una competición

por el agua menor, como por ejemplo los cultivos leñosos cultivados con rotaciones de varios años. Algunas especies perennes pueden incrementar la función de retención de agua en tierras degradadas, y se pueden obtener ganancias considerables en la eficiencia de uso del agua con manejos agrícolas mejorados. Aunque la producción de biomasa como materia prima puede tener impactos fuertes en la calidad del agua a partir del uso de fertilizantes y pesticidas, existen materias primas de segunda generación en muchas regiones que requieren para la producción cantidades menores de químicos que otros cultivos convencionales no destinados a la producción de biomasa. Durante la etapa de procesamiento de la biomasa para combustibles, la calidad del agua también puede verse afectada, aunque el impacto negativo se puede reducir mediante tecnologías de digestión anaeróbica disponibles.

1.4.5 Buenas prácticas agrícolas

La adopción de buenas prácticas agrícolas, tal como la gestión integrada de plagas (Figura III-5b) y suelos, la no labranza o labranza mínima, la retención de la cobertura de suelos, los cultivos múltiples, la selección adecuada del cultivo y la rotación de cultivos pueden mitigar los efectos negativos en el medio ambiente de la producción de bioenergía, en especial aquellos relacionados con carbono, suelos y recursos hídricos. La implementación de dichas prácticas también puede reducir la amenaza a la biodiversidad, especialmente la biodiversidad de los suelos, a través de la retención de residuos de cultivos y la diversificación de los cultivos de rotación. La flora puede ser enriquecida a través de la introducción de manejo de paisajes en zonas agrícolas y la retención de corredores ecológicos así como a través del uso cuidadoso y sostenible de fuentes de biomasa de alta biodiversidad como el pasto como materia prima.

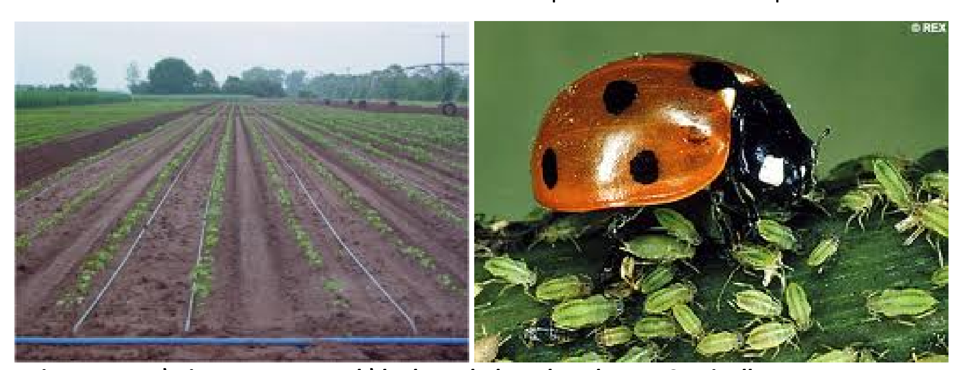


Figura III-5. a) Riego por goteo y b) la depredadora de pulgones Coccinella septempunctata

Asimismo, sistemas de cultivos no-alimenticios también podrían contribuir a enriquecer la agro-biodiversidad. Promoviendo la integración de sistemas de producción local, tanto de energía como de alimentos que combinen la producción de materia prima con la producción de cultivos, y la alimentación de ganadería con biomasa no utilizada para la producción de energía, podría evitar desperdicios e incrementar la productividad del sistema de alimentos y energía.

1.4.6 Salud humana y calidad ambiental

A parte de los impactos ambientales descritos, que pueden tener un efecto en la calidad ambiental, existen otros asociados a la producción, transformación y uso de la bioenergía. Con el uso de la energía y sus tecnologías se producen contaminantes del aire que tienen impactos importantes en la salud humana. Por ejemplo, las partículas de carbón negro (*black carbon*, BC) son contaminantes que se producen por una combustión incompleta de combustibles fósiles y combustibles derivados de la biomasa. Las emisiones de BC son especialmente altas en los países en vías de desarrollo. Tienen efectos muy negativos en la salud humana y pueden acelerar el cambio climático. Las principales fuentes de BC son los incendios forestales y agrícolas, maquinaria de combustión (diesel), y el uso residencial de combustibles para cocinar y calentar los espacios. Los hornos mejorados para cocinar y sistemas avanzados de biomasa, son realmente efectivos para el ahorro de costes y para conseguir otros beneficios como la reducción del consumo de energía y la mitigación del cambio climático. Se han indicado ahorros en combustible de entre un 30-60 % con el uso de estos sistemas. Por ejemplo, los sistemas avanzados de biomasa como las estufas para biogás a pequeña escala, han sufrido mejoras en el diseño que incrementan la eficiencia energética y reducen hasta un 90 % la producción de gases de efecto invernadero y otras emisiones perjudiciales para la salud humana.

1.4.7 Accidentes y riesgos

Para reducir posibles riesgos y peligros asociados a la producción de combustibles es necesario evaluar los siguientes puntos:

- Riesgos de salud para los trabajadores que usan microorganismos modificados o sus metabolitos
- Efectos potenciales en los ecosistemas de la liberación de microorganismos modificados al medio ambiente
- Impactos en los trabajadores, consumidores de biocombustibles o en el medio ambiente a partir de pesticidas y micotoxinas que se acumulan en compuestos intermediarios, residuos o productos durante el procesamiento
- Riesgos para los trabajadores a partir de agentes infecciosos que pueden contaminar la materia prima durante la fase de producción; exposición a sustancias tóxicas, particularmente para los trabajadores de sistemas de procesos termoquímicos de la biomasa que usan rutas que en la actualidad no se emplean en la industria de los combustibles fósiles
- Control de fugas de emisiones de aire e impactos en la salud pública, la calidad del aire, el agua y los ecosistemas
- Exposición de sustancias tóxicas, particularmente si las instalaciones de producción llegan a ser un lugar común como por ejemplo los vertederos o las estaciones para generar electricidad o gas natural

- Impactos ambientales acumulativos en el aire y/o el agua derivados del emplazamiento de múltiples instalaciones para la producción de biocombustibles.

1.5 CRITERIOS AMBIENTALES GENERALES PARA EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LA BIOENERGÍA

Los estudios de viabilidad ambiental tendrán en cuenta el escenario de cambio climático y la protección de la biodiversidad y la calidad del medio ambiente y la salud humana.

Los criterios generales que se tendrán en cuenta son:

- **El tipo de materia prima y sus características:** residuos industriales, agrícolas, forestales, cultivos energéticos, etc.
- **El producto que se quiere obtener a partir de dicha materia prima**: ej. etanol, biodiesel, pélets, etc., sus características y la tecnología asociada.
- **La idoneidad como alternativa de uso:** (ej. el mejor uso posible del suelo frente a otras alternativas en el caso de los cultivos energéticos, balance energético, consumo de agua, etc.). Deberán tenerse en cuenta los efectos directos e indirectos del cambio de uso del suelo:
  - Son preferibles los sistemas integrales a pequeña escala y cercanos a los lugares de producción del recurso o residuos.
  - Los biocombustibles no pueden producirse con material proveniente de zonas de alto valor ecológico y biodiversidad.
  - Los biocombustibles no deben producirse con material proveniente de áreas con altos stocks de carbono (ej. turberas).
  - Tanto en sistemas agrícolas como forestales se deben utilizar los excedentes de la biomasa tras garantizar la fertilidad del suelo (la realización de balances de materia orgánica puede ser un criterio para calcular los excedentes).
  - Las técnicas de cultivo y los productos químicos utilizados (fitosanitarios, abonos) en los cultivos energéticos no supondrán un incremento del uso intensivo del terreno agrícola. En el caso de los cultivos leñosos forestales, la selvicultura utilizada para la producción de madera deberá estar basada en criterios de sostenibilidad según estándares de certificación forestal.
  - No se utilizarán terrenos forestales con función de protección de cuencas hidrográficas o de valor para la biodiversidad. La superficie forestal podría aumentarse con nuevas repoblaciones, pero serán necesarios estudios de viabilidad para determinar la capacidad de los ecosistemas forestales para generar la cantidad de biomasa de este tipo.
  - La madera muerta y seca tiene también su función en el bosque por lo que habrá que determinar su cantidad y no eliminarla totalmente

- **Se deben evaluar las emisiones o productos secundarios** (ej. tóxicos y contaminantes del aire y el agua) que aparecerán con la transformación y uso de dicha materia prima o producto para algo en concreto. Debe ser prioritaria la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero; el carbono liberado durante la producción, transporte y aprovechamiento debe ser inferior al absorbido o fijado por la propia biomasa.

1.6 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Chum H, Faaij A, Moreira J et al. 2011. Bioenergy. En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R.Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

Cromer AH. 1994. Física para las ciencias de la vida. 2ª Edición. Editorial Reverté S.A. Barcelona. 588 pp. ISBN: 13:978-84-291-1808-7.

DIR 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.

Johnson E. 2009. Goodbye to carbon neutral: getting biomass footprints right. *Environmental Impact Assessment Review*. 29:165-168.

Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. 2004. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*. 21: 231–246.

OSE 2011. Biodiversidad en España. Base de la sostenibilidad ante el cambio global. Ed. Observatorio de Sostenibilidad en España. Madrid. 490 pp. ISBN: 987-84-8476-433.

Sathaye J, Lucon O, Rahman A et al. 2011. Renewable Energy in the Context of Sustainable Development. En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

2 IMPACTOS SOCIO-ECONÓMICOS Y CRITERIOS SOSTENIBLES PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA BIOMASA

2.1 INTRODUCCIÓN

La compleja naturaleza de la bioenergía, con numerosas rutas de conversión y lo variado de sus impactos socio-económicos, hace que sea difícil llevar a cabo un análisis sobre los mismos, sobre todo, teniendo en cuenta que muchos de ellos son difícilmente cuantificables en términos numéricos o monetarios. Aún así, el desarrollo de la bioenergía (o energía de la biomasa) se puede asociar a un conjunto complejo de aspectos y equilibrios socio-económicos, que incluyen desde aspectos locales, como la generación de ingresos y empleo, mejora de las condiciones de salud, mejora de la estructura de los sistemas agrarios y propiedad de la tierra, competición por el uso de la tierra y fortalecimiento de las economías regionales, hasta asuntos nacionales como la seguridad alimentaria, el acceso asegurado a la energía y un balance del comercio. La participación de la gente afectada/interesada, particularmente pequeños agricultores y familias es esencial para asegurar los beneficios socio-económicos de los proyectos de la bioenergía. En este tema se presentan los efectos más importantes del aprovechamiento energético de la biomasa en la sociedad y en la economía, y el flujo de materia y energía en los sistemas naturales, que es de donde se obtiene el capital natural.

2.2 IMPACTO DE LA ENERGÍA EN EL DESARROLLO ECONÓMICO

El acceso a la energía mejora el nivel de vida y posibilita la generación de ingresos. Históricamente, el sector de la energía se ha percibido como fundamental para el desarrollo económico, existiendo una fuerte correlación entre el crecimiento económico y el aumento del consumo de energía. Esto es así porque el desarrollo económico de un país se relaciona con sus capacidades productivas en el sector primario (agricultura, selvicultura, ganadería, pesca y minería), secundario (industria) y terciario (servicios). Dentro de estos últimos juega un papel determinante el transporte y las comunicaciones, que permiten el comercio entre las sociedades. Todas estas actividades implican un elevado consumo de energía al que hay que sumar el de los hogares.

Los países en diferentes niveles de desarrollo tienen diferentes incentivos para avanzar en la utilización y desarrollo de la bioenergía. Para los países en vías de desarrollo, las razones más probables para adoptar la biomasa como fuente de energía son facilitar el acceso a la energía, crear oportunidades de empleo formales (regulado legalmente), y reducir los costes debidos a la importación de energía (o en el caso de los países exportadores de energías fósiles, prolongar la vida media de sus recursos naturales base). Para países industrializados, las principales razones incluyen la reducción de emisiones de carbono y mitigar el cambio climático, posibilitar un acceso seguro a la energía, y promover activamente el cambio estructural en la economía, haciendo que

pérdidas de empleo en sectores en declive sean amortiguados por nuevas oportunidades de empleo en la producción de bioenergía. En cuanto a los impactos económicos, las variables más comúnmente aportadas para su evaluación son los costes de producción, asumiendo un conjunto de precios para mercancías básicas (ej. combustibles fósiles y fertilizantes). Los costes son generalmente comparados con alternativas que ya existen en los mercados para juzgar el potencial competitivo.





2.3 ACCESO A LA ENERGÍA Y DESARROLLO HUMANO

Existe una fuerte correlación entre el uso de la energía y el índice de desarrollo de una sociedad humana, y se cumple la premisa de que los países más desarrollados son también los mayores consumidores de energía. Además, aspectos fundamentales para el desarrollo humano como la educación, la igualdad de género y la seguridad ambiental dependen en gran medida del acceso a la energía. La correlación positiva entre el uso de energía y el índice de desarrollo humano indica que se requiere una cantidad mínima de energía para garantizar un bienestar y un estándar de vida aceptable. Desde una perspectiva de desarrollo sostenible, es necesario incrementar la disponibilidad de servicios energéticos a grupos que actualmente no tienen acceso nulo o limitado a ellos, como la población de zonas rurales o con escasos recursos económicos, y que además estos sean servicios energéticos limpios y modernos (renovables como la biomasa). Un acceso básico a la energía para luz, comunicación, sanidad y educación puede reportar importantes beneficios para la comunidad y los hogares, incluso suponer un ahorro de costes.

El acceso a los servicios energéticos modernos está íntimamente correlacionado con el grado de desarrollo de las comunidades humanas. Los Objetivos de Desarrollo del Milenio (*Millennium Development Goals*) son:

- Erradicar la pobreza extrema y hambrunas.
- Conseguir que el acceso a la educación primaria sea un derecho universal.
- Promover la igualdad de género y fortalecer a las mujeres.
- Reducir la tasa de mortalidad infantil y mejorar la salud de la madre.
- Combatir enfermedades como el sida, la malaria y otras.

- Asegurar la sostenibilidad ambiental y desarrollar relaciones globales para el desarrollo.

La relación entre el acceso a la energía moderna y el logro de los objetivos de desarrollo del milenio quedó patente en el Plan de Aplicación de Johannesburgo que emergió de la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible en el 2002 (IEA, 2010). El papel de la energía de la biomasa puede ser más importante en las zonas rurales, alejadas del acceso principal a la energía, aunque en zonas urbanas puede suponer un aporte de energía extra y una vía de aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos, que puede generar diferentes opciones sociales y económicas. Actualmente, 2,7 billones de personas dependen de la biomasa tradicional como la madera, el carbón vegetal y el estiércol para cocinar, y se estima que otro medio billón utiliza carbón mineral. Este uso, generalmente en interior, tiene una serie de efectos negativos. Estos incluyen impactos en la salud, impactos sociales como el tiempo invertido en reunir el combustible (realizado fundamentalmente por mujeres y niños) o las altas cuotas de los ingresos pagados por pequeñas cantidades de biomasa comercial, y también efectos negativos como la deforestación en áreas donde el carbón vegetal y los mercados basados en la biomasa son los combustibles dominantes.





Ejemplos de impacto socio-económicos de la bioenergía a pequeña escala son los proyectos de hornos mejorados para cocinar basados en las estufas y calderas de biomasa de nueva generación. El uso de estos sistemas tiene importantes beneficios para la salud humana. Los beneficios incluyen entre un 70-90 % de reducción de contaminación dentro del hogar, la reducción de la exposición del humano a esta contaminación en un 50 % y la reducción de muchas enfermedades coronarias y respiratorias relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica. Con el uso de estos hornos para cocinar y estufas y calderas avanzados de biomasa, la reducción del tiempo de cosecha del combustible y el ahorro en el tiempo para cocinar también se pueden trasladar a un mayor tiempo para la educación de niños en zonas rurales, especialmente las niñas. También pueden mejorar las condiciones de vida en la cocina, en el hogar y la calidad de vida. La manufactura y distribución de estos productos también puede suponer una fuente de ingresos y empleo. Impactos similares se han detectado para plantas de biogás a pequeña escala, las cuales tienen los beneficios

añadidos de proporcionar luz para hogares individuales y pueblos, incrementando la calidad de vida.

Los impactos socio-económicos de la bioenergía a gran escala han provocado un importante debate alrededor de la seguridad alimentaria, el desarrollo rural y la propiedad de la tierra. Esta controversia ha dejado patente que las ventajas o desventajas de un mayor desarrollo de la bioenergía a gran escala, dependerán de las características del sistema de bioenergía, las condiciones locales y el modo de implementación de la tecnología. Los impactos en el empleo y la generación de ingresos pueden ser muy positivos porque un aumento en la demanda de materiales de desecho (residuos) puede suponer un ingreso extra para los sectores agrícola y forestal, aunque el número de puestos de trabajo creados puede variar mucho en función del tipo de cultivo o la intensidad del trabajo (operaciones costosas pueden reducir la competitividad en función de los precios de mercado), el tamaño de la planta de producción de energía (biorefinería, producción de biogás, calor, etc.), el grado de mecanización para la producción de la materia prima, el tipo de combustible que se quiere obtener, etc.

2.4 SEGURIDAD ALIMENTARIA

Aunque se están haciendo esfuerzos considerables para encontrar nuevos cultivos que aumenten la producción de etanol o biodiesel que no sean cultivos tradicionales para alimentación humana o pienso, muchas de las materias primas vegetales que actualmente se utilizan para la producción de etanol son también fuentes tradicionales de alimento (maíz, soja, trigo, etc.). Esto, junto con la desviación de los cultivos o el suelo (cambio de uso del suelo) para la producción de bioenergía puede influir en los precios de alimentos básicos y en la seguridad alimentaria de muchas sociedades rurales o países en vías de desarrollo.

A favor de la seguridad alimentaria, las fuentes de biomasa lignocelulósica tienen amplias posibilidades porque:

- no compiten directamente con la producción de alimento
- pueden ser cultivados específicamente para la producción de energía, permitiendo una mayor producción por unidad de área.
- se pueden utilizar los residuos de la producción de cultivos con lo que se consigue aumentar la eficiencia del uso del suelo
- permiten la integración de operaciones de manejo del agua con una variedad de otras industrias que están haciendo una prospección de simbiosis industriales a nivel local.

2.5 SEGURIDAD ENERGÉTICA

No existe una definición exacta de seguridad energética. El concepto se asocia a la solidez frente a la interrupción del suministro de energía. Hay dos aspectos básicos,

tanto para los sistemas energéticos actuales como para los basados en energías renovables: la disponibilidad de los recursos y la variabilidad y fiabilidad del suministro. Debido a la gran interdependencia entre el crecimiento económico y el consumo de energía, el acceso a un suministro estable de energía es un asunto político de suma importancia y un desafío al que se enfrentan tanto los países desarrollados como los países en vías de desarrollo. La interrupción prolongada de energía podría crear serios problemas económicos y funcionales básicos en la mayoría de las sociedades.

2.5.1 Disponibilidad y distribución de los recursos

La disponibilidad y distribución de recursos es un punto crítico en la seguridad energética. La dependencia de importación de energía es una fuente de inseguridad. En comparación con las fuentes de energía fósiles, la energía de la biomasa puede estar distribuida en el mundo de forma más regular. Una gestión y aprovechamiento energético sostenible de los recursos, podría disminuir la dependencia y la importación de energía, y representa una buena oportunidad para aumentar la seguridad energética.

2.5.2 Variabilidad y fiabilidad del suministro de energía

Es difícil identificar indicadores específicos sobre seguridad energética, pero en base a los dos criterios descritos más arriba, se pueden emplear los siguientes indicadores de desarrollo sostenible de energía segura:

- La magnitud de las reservas.
- La proporción entre las reservas y la producción.
- El reparto de las importaciones en consumo total de energía primaria.
- El reparto de las importaciones de energía del total de las importaciones.
- El reparto de los recursos renovables variables e impredecibles.

2.5.3 Valorización de residuos

La valorización de residuos puede mejorar el acceso a la energía, a ingresos y empleo en zonas rurales, que gracias al aumento de puestos de trabajo/fijación de población puede producir un reequilibrio territorial en zonas con problemas de despoblamiento.

Los residuos susceptibles de valorización son de tres fuentes principales: por un lado la utilización de restos de actividades agrícolas y forestales, tales como la paja de cereal, sarmientos, restos de podas, trasmochos (corta de la copa), desbroces para cortafuegos y otros tratamientos forestales; por otro los residuos sólidos urbanos orgánicos, y por último residuos de industrias agroalimentarias y madereras. Con la valorización de estos residuos, además de resolver el problema de su eliminación, se pueden rentabilizar tareas agrícolas y trabajos forestales necesarios que de otra forma no se realizarían.

2.6 FLUJO DE MATERIA Y ENERGÍA (CAPITAL NATURAL) EN LOS ECOSISTEMAS NATURALES

2.6.1 Productividad primaria de biomasa

La productividad primaria bruta (PPB) de un ecosistema es la tasa con que la biomasa es producida por unidad de superficie por parte de los productores primarios (fundamentalmente por las plantas). Se define como la fijación total de energía a través de la fotosíntesis y puede ser expresada en unidades de materia orgánica seca (Kg ha^{-1} $año^{-1}$) o en unidades de energía (J m^{-2} $día^{-1}$). Una parte de la PPB es eliminada del sistema a través de la respiración. La diferencia entre la PPB y la respiración se conoce con el nombre de productividad primaria neta (PPN) y representa la tasa real de producción de nueva biomasa que queda a la disposición del consumo por parte del resto de organismos heterótrofos del sistema (bacterias, hongos, animales).

La PPN es un dato básico necesario en el planteamiento y manejo de los recursos naturales. La PPN varía estacionalmente de un año a otro en el mismo sitio, y existe una tendencia latitudinal general de incremento de productividad desde las condiciones boreales, pasando por las templadas, hasta las tropicales (Tabla III-4), siendo la biomasa vegetal de los bosques tropicales y las sabanas la que más contribuye anualmente (60% de la PPN).

En los ecosistemas, el carbono fijado en la productividad primaria bruta puede abandonar el sistema en forma de carbono inorgánico (generalmente en forma de CO_2) vía respiración autótrofa, o después de ser consumido por otros organismos, vía respiración heterótrofa. Cuando la PPB es mayor que la respiración total, el sistema está fijando carbono a mayor velocidad que su liberación, y el ecosistema actúa como sumidero de carbono. Sin embargo, cuando la respiración es mayor que la PPB, el sistema está liberando carbono a mayor velocidad que su fijación, y el ecosistema actúa como fuente de carbono.

Tabla III-4. Productividad primaria bruta de ecosistemas forestales (g de carbono por m^{-2} y año) de diferentes latitudes del norte y sur de América y Europa, estimada como la suma de la productividad neta del ecosistema y la respiración del ecosistema (Begon et al, 2006)

TIPO DE BOSQUE	PPB media (g C m^{-2} $año^{-1}$)
Bosque tropical	3249
Bosque planifolio temperado	1327
Bosques de coníferas temperadas	1499
Bosques nemorales de planifolios	1034
Bosques de coníferas boreales	1019

La productividad de un ecosistema se puede relacionar con el peso total de biomasa que la produce (La tasa de interés obtenida por la biomasa). Por otro lado, también podemos considerar la productividad de la biomasa como fuente que genera la biomasa (el peso total) del ecosistema (La productividad es la que hace aumentar los recursos). Independientemente del punto de vista que consideremos, al analizar el ratio PPN/B (los Kg de peso seco producidos cada año en relación a los kg de biomasa

seca total), vemos que hay enormes diferencias en el segundo factor entre ecosistemas terrestres y los acuáticos (ya sean continentales u oceánicos), es decir, los cocientes PPN/B son muy bajos en los bosques y muy altos en las comunidades acuáticas. Esta relación queda más clara si observamos la Figura III-6 y la Tabla III-5.

La razón principal de que los océanos sean más productivos se debe a que una gran proporción de la biomasa de los bosques está muerta, y también a que una gran parte del tejido vivo de sostén no es fotosintetizador. Sin embargo, en los océanos, particularmente cuando la productividad es debida al fitoplancton, no existe tejido de sostén, las células muertas no se acumulan (generalmente son ingeridas antes de morir), y la producción fotosintética por Kg de biomasa es por consiguiente muy elevado. Otro factor que ayuda a explicar los elevados cocientes de PPN:B de las comunidades de fitoplancton se halla en la rápida renovación de la biomasa.

En los sistemas terrestres, los cocientes PPN:B tienden a decrecer durante la sucesión vegetal. Las especies pioneras son plantas herbáceas de crecimiento rápido y con una cantidad relativamente escasa de tejido de sostén. Así en las primeras etapas de la sucesión, el cociente PNN: B es elevado. Sin embargo, las especies que dominan más tarde la sucesión suelen ser de crecimiento lento, pero acaban alcanzando un tamaño considerable y monopolizando el abastecimiento de espacio y luz. Su estructura comporta una considerable inversión en tejido de sostén muerto y no fotosintetizador, y a consecuencia de ello su cociente PNN:B es menor.

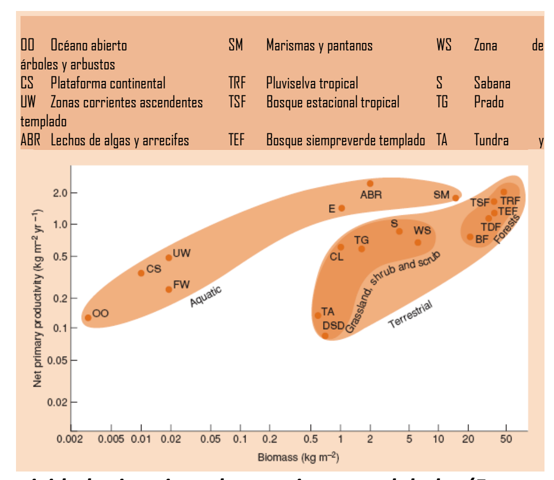


Figura III-6. Productividad primaria en los ecosistemas globales (Fuente: Begon et al 2006)

Tabla III-5. Productividad primaria neta (PPN) anual y biomasa de cosecha en pie en diversas comunidades del mundo (según Whittaker, 1975)

	PPN por unidad de área (g /m^2 o t /km^2)			**Producción Primaria neta**	**Biomasa por unidad de área (kg /m^2)**		
TIPO DE ECOSISTEMA	**Área (106 km^2)**	**Límites normales**	**Media**	**Mundial (109 t)**	**Límites normales**	**Media**	**Biomasa mundial (109 t)**
Pluviselva tropical	17,0	1000-3500	2200	37,4	6-80	45	765
Bosque estacional tropical	7,5	1000-2500	1600	12,0	6-60	35	260
Bosque siempreverde templado	5,0	600-2500	1300	6,5	6-200	30	175
Bosque caducifolio templado	7,0	600-2500	1200	8,4	6-60	20	210
Bosque boreal	12,0	400-2000	800	9,6	6-40	6	240
Zona de árboles y arbustos	**8,5**	250-1200	700	6,0	2-20	4	50
Sabana	**15,0**	200-2000	**900**	**13,5**	0,2-15	**1,6**	60
Prado templado	**9,0**	200-1500	600	5,4	0,2-5	0,6	14
Tundra y zona alpina	**8,0**	10-400	140	1,1	0,1-3	0,7	5
Matorral de desierto y semidesierto	**18,0**	10-250	90	1,6	0,1-4	0,2	13
Desierto extremo, rocas, arena y hielo	**24,0**	0-10	3	0,07	0-0,2	0,2	0,5
Terrenos cultivados	**14,0**	100-3500	650	9,1	0,4-12	1	14
Marismas y pantanos	**2,0**	800-3500	200	4,0	3-50	15	30
Lagos y ríos	**2,0**	100-1500	250	0,5	0-0,1	0,02	0,05
Total continental	**149**		773	115		12,3	1837
Océano abierto	332,0	2-400		41,5	0-0,005		1,0
Zonas de corrientes ascendentes	0,4	400-1000		0,2	0,005-0,1		0,008
Plataforma continental	26,6	200-600		9,6	0,001-0,04		0,27
Lechos de algas y arrecifes	0,6	500-4000		1,6	0,04-4		1,2
Estuarios	1,4	200-3500		2,1	0,01-6		1,4
Total marino	361		152	55,0			3,9
TOTAL	**510**			**170**		**3,6**	**1841**

2.6.2 Interdependencia, cadenas tróficas y ciclos bio-geoquímicos

Las plantas son los productores primarios y constituyen el primer nivel trófico de una comunidad (Figura III-7); los consumidores primarios (herbívoros) se encuentran en el segundo nivel trófico, y los consumidores secundarios (carnívoros) se encuentran en el tercer nivel, y así sucesivamente. De esta forma, se produce una estructura piramidal en la que la productividad de las plantas proporciona una amplia base de la que depende una productividad más reducida aún de los consumidores secundarios, y así sucesivamente.

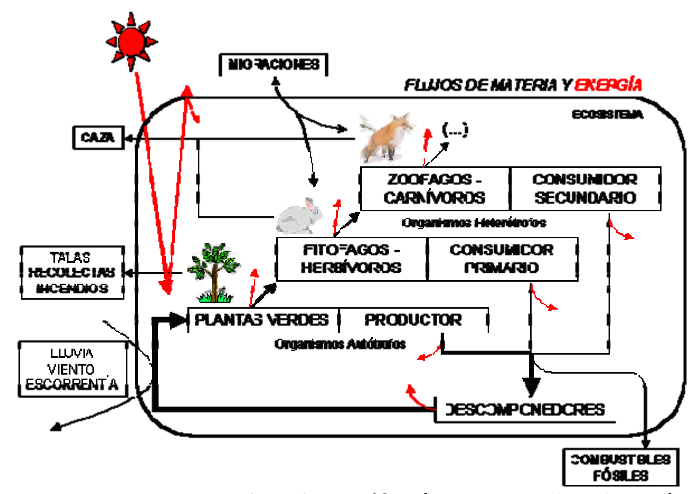


Figura III-7. Esquema de cadena trófica (Fuente: es.wikipedia.org)

Por otro lado, una gran parte de la biomasa primaria producida por las plantas muere sin haber sido consumida y sostiene a la comunidad de descomponedores (bacterias, hongos y animales detritívoros); y no toda la energía que ha sido asimilada es convertida realmente en biomasa, ya que una parte de ella se pierde en forma de calor respiratorio. En cuanto a los productos de secreción y excreción ricos en energía, que han tomado parte en los procesos metabólicos, pueden ser considerados como producción). Si las plantas y sus consumidores no sufrieran finalmente la descomposición, el suministro de nutrientes se agotaría y la vida en la Tierra desaparecería. Este aspecto es muy importante, y es necesario estudiar qué fracción de la biomasa residual puede ser aprovechada por parte del ser humano para producir energía (calor, electricidad, carburantes). La actividad de los microorganismos heterótrofos es crucial en el ciclo de los nutrientes y el mantenimiento de la productividad de los ecosistemas.

Sin entrar en detalle en los ciclos biogeoquímicos y procesos de descomposición de la materia, sí diremos que la proporción de nutrientes en la biomasa viva aumenta desde los Polos hacia el Ecuador. Los procesos de descomposición son muy lentos en las zonas boreales, y los nutrientes se acumulan en la materia orgánica muerta. En cambio, las condiciones climáticas de una pluviselva tropical favorecen la

descomposición rápida. Los nutrientes son rápidamente liberados de la materia orgánica muerta, quedando en el suelo donde pueden ser lixiviados. En una comunidad de este tipo, la mayoría de los nutrientes se encuentran en la biomasa viva.

2.6.3 Factores que limitan la productividad primaria en ecosistemas terrestres

Entre los factores que limitan la productividad terrestre, el límite último lo constituye la cantidad de radiación solar incidente (sin la que no puede existir fotosíntesis). Esta radiación incidente se utiliza con diferentes grados de eficiencia por cada una de las comunidades. Las causas que motivan los distintos niveles de aprovechamiento de la energía recibida pueden ser encontradas en:

a) la escasez de agua que restringe la tasa de fotosíntesis,

b) la escasez de nutrientes minerales esenciales que reduce la tasa de producción de tejido fotosintético y su eficacia en la fotosíntesis,

c) las temperaturas que son letales o demasiado bajas para el crecimiento,

d) una profundidad insuficiente del suelo,

e) una cobertura incompleta del follaje, de modo que gran parte de la radiación incidente cae sobre el suelo en vez de sobre el follaje (esto puede ser debido a la estacionalidad de la producción de las hojas y de su desprendimiento, o bien a la defoliación por parte de los animales ramoneadores, las plagas o las enfermedades),

f) la baja eficacia con que las hojas realizan la fotosíntesis- incluso bajo condiciones ideales, una eficacia superior al 10 % (de la PAR) es difícil de lograr incluso en los sistemas agrícolas más productivos.

Sin embargo, la mayor parte de la variación de la productividad primaria de una comunidad puede estar limitada por una sucesión de los factores desde *a)* hasta *e)*.

Por último, las actividades humanas contribuyen con ingresos significativos de nutrientes (sobre todo N y P en fertilizantes) en muchas comunidades. Por ejemplo, las cantidades de CO_2, óxidos de nitrógeno y azufre en la atmósfera han sido incrementadas por la quema de combustibles fósiles, y las concentraciones de nitrato y fosfato en los sistemas acuáticos continentales han sido incrementadas por las prácticas agrícolas y la eliminación de desechos, conduciendo a poca productividad, zonas anóxicas en muchos estuarios, mayor coste de procesamiento del agua potable y el declive en las capturas de pescado y marisco.

2.6.4 Apropiación humana de la producción primaria neta

Una comparación con la producción de la biomasa agrícola y forestal actual nos puede dar una perspectiva del potencial de suministro de la energía de la biomasa en relación a las cantidades que se cosechan actualmente. En este momento, la producción global de energía a partir de la industria de la madera en rollo se corresponde con unos 15-20 EJ/año (1EJ=10^{18}J), mientras que el de la cosecha global de los principales cultivos

energéticos (cereal, tubérculos, etc.) se corresponde con unos 60 EJ/año. Esto sugiere que la extracción de biomasa forestal y agrícola tendrá que incrementarse sustancialmente para proporcionar materia prima para el sector de la energía de la biomasa, en cantidades lo suficientemente grandes como para constituir una contribución significativa para el suministro de energía del futuro.

Existen muchos estudios realizados sobre la apropiación humana de la producción primaria neta terrestre a través de todos los usos humanos de la biomasa (HANPP, human apropriation net primary productivity), que tienen en cuenta toda la productividad neta ganada y perdida debido a las actividades humanas e incluyen lo cosechado y lo devuelto en forma de abono o compost. En estos estudios se indica que en la actualidad, las sociedades se apropian de una parte sustancial de la producción primaria neta a nivel planetario.

2.7 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Bennett EM, Balvanera P 2007. The future of production systems in a globalized World. *Frontiers in Ecology*. 5(4):191-198.

Begon M, Harper L, Townsend J. 1988. Flujo de energía y materia en las comunidades. En: *Ecología, Individuos, Poblaciones y Comunidades*. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Begon M, Colin R, Townsend J, Harper L. 2006. The Flux of Energy through Ecosystems. In: *Ecology, from Individuals to Ecosystems*. 4th Edition. Blackwell Publishing. UK, 738pp.

Chum H, Faaij A, Moreira J, Berndes G et al. 2011. Bioenergy. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R.Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

International Energy Agency (IEA). 2010. Projected Costs of Generating Electricity 2010 Edition

Sathaye J, Lucon O, Rahman A et al. 2011. Renewable Energy in the Context of Sustainable Development. En *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and NY, USA.

Whittaker, R. H. 1975. Communities and ecosystems. 2nd Edition. Macmillan, London.

3 ENERGÍA Y HUELLA ECOLÓGICA

3.1 INTRODUCCIÓN

La huella ecológica es una medida, o indicador de sostenibilidad fuerte, del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, relacionándola con la capacidad de la Tierra para regenerar sus recursos. La huella ecológica se centra en seis demandas potencialmente renovables: cultivos agrícolas, pastos, bosques, tierras para construcción, pesca y energía. Las actividades relacionadas con estos sectores están consideradas como sostenibles si las tasas de uso del recurso y de generación de residuos no exceden un límite definido que la biosfera puede soportar sin degradar la fuente del recurso. En cuanto a la huella ecológica del aprovechamiento energético de la biomasa, hay que decir que la mayoría de los estudios que hay sobre el tema se centran en los sectores primarios (pesca, producción agrícola, etc.), y en el caso de las energías, principalmente en las energías fósiles. Esto se debe a que las energías renovables proporcionan fracciones muy pequeñas de la energía comercial. En este tema se presentan primero los conceptos y las metodologías generales para el cálculo de la huella ecológica, y al final tres ejemplos específicos para la energía de la biomasa.



3.2 HUELLA ECOLÓGICA Y OTROS CONCEPTOS GENERALES

La huella ecológica puede definirse como el área biológicamente productiva requerida para proveer de forma continuada el aporte de recursos y absorber los desechos de una población en particular. Es un indicador del área que una comunidad usa y habita, y un indicador de los efectos de las acciones de la sociedad en el ambiente, mediante la cantidad de uso de tierra requerida para mantener su actual estilo de vida (Stöglhner, 2003). A partir de esta definición, se pueden extraer dos conclusiones generales a nivel local y regional: 1) una huella ecológica menor que el área local o regional disponible abre la posibilidad de exportar biocapacidad en forma de bienes de consumo; 2) una huella ecológica mayor que el área disponible revela que es necesario el comercio para usar los recursos de un área de influencia (hinterland). La huella ecológica se calcula traduciendo todos los materiales y consumo de energía de una

unidad económica, por ejemplo una familia, una comunidad local, una región, una nación o la humanidad, en una demanda de área de tierra. Por lo tanto, los materiales y la energía usada tienen que ser recopilados, a menudo usando modelos de entradas y salidas, y transferidos a una huella ecológica multiplicándolos por un índice de necesidad de tierra (Stöglhner y Narodoslawsky, 2009).

Para entender bien cómo funciona y cómo se calcula, es necesario definir otros términos relacionados con la productividad y la sostenibilidad:

1 **Espacio biológicamente productivo:** se define como áreas bioproductivas de tierra o agua capaces de soportar la fotosíntesis a unas tasas suficientes para poder proporcionar concentraciones de biomasa útil económicamente.
2 **Productividad:** es una medida de la tasa potencial de producción biológica de un área concreta. Se pueden utilizar varios indicadores para estimar la productividad, incluyendo la aptitud agrícola, producción primaria neta potencial o la extracción de biomasa útil.
3 **Biocapacidad:** es la productividad potencial del espacio biológico productivo dentro de un país, región o territorio específico.
4 **Déficit ecológico:** es la cantidad por la cual la huella ecológica de una población (región o país) excede la biocapacidad del espacio disponible para esa población.
5 **Exceso del límite ecológico (ecological overshoot):** se define como el déficit conseguido a través de la sobre explotación de los recursos o debido a la acumulación de residuos. Define la idea de consumir más, o ir más lejos, de lo planeado o disponible. William Catton define el término como “el crecimiento más a allá de la capacidad de carga de un área, conduciendo al colapso”.
6 **Energía representada (embodied energy):** es la energía utilizada durante el ciclo de vida entero de un producto para la elaboración, transporte, funcionamiento y/ o eliminación.
7 **Hectárea global (gha):** es una medida (unidad común) de la tasa potencial de la producción biológica de una superficie en concreto. Cada hectárea global representa una unidad común de productividad biológica.

3.3 ENFOQUES BÁSICOS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA ECOLÓGICA DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA

Las líneas generales que presentamos para abordar el cálculo de la huella ecológica están basadas en el método de las cuentas (accounting method), que principalmente consiste en enumerar todos los elementos relacionados con el proceso o producto que queremos evaluar.

3.3.1 Métodos basados en los componentes y en los compuestos

El método basado en los componentes se aborda de abajo a arriba; identifica primero todos los artículos o componentes relevantes y entonces calcula o valora la huella

ecológica de cada uno usando datos sobre el ciclo de vida del componente. La exactitud del resultado final depende de lo completa que sea la lista de componentes y de la fiabilidad de la evaluación del ciclo de vida de cada componente (life cycle assessment, LCA). Esta aproximación proporciona un elevado nivel de detalle pero tiene limitaciones debido a las frecuentes inexactitudes en los ciclos de vida, límites pobremente definidos y ciclos incompletos (Wackernagel y Monfreda, 2004). Aun así, existen ejemplos de huella ecológica empleando este método, como los elaborados a nivel regional en Austria (Stöglhner y Narodoslawsky, 2009).

El método basado en los compuestos se aborda de arriba a abajo; la huella agrupa el área total que una cierta población, organización, o proceso requiere para producir comida, fibra, y madera, así como para proveer espacio para infraestructura y mantener el consumo de energía. La biocapacidad, que es la productividad potencial del espacio biológico productivo dentro de un país, región o territorio específico, agrupa el área total disponible para satisfacer estas demandas.

3.3.2 Índice de proceso sostenible

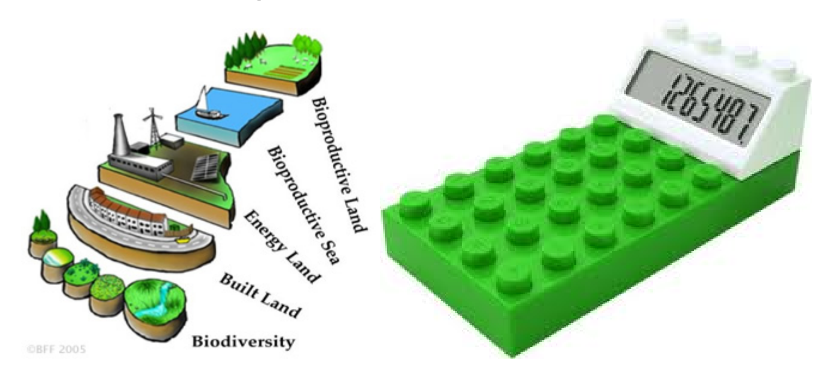
El índice de proceso sostenible (Sustainable Process Index, SPI) fue propuesto por Krotscheck y Narodoslawsky (1996). Este índice relaciona la necesidad de tierra requerida para un cierto proceso (producción, servicios, etc.) con un área de una región concreta. La sostenibilidad regional se consigue si el SPI de todos los procesos de la región no excede de 1. Áreas de importación y exportación se hacen visibles como materiales y energía representada en bienes de comercio y servicios. El cálculo del SPI tiene en cuenta sub-áreas diferentes para recursos materiales, energía, personal, procesos de instalación (ej. máquinas para el proceso de producción), disipación del producto (evaluación de la calidad de los desechos y la cantidad de flujo de materiales diferentes y energía), y emisiones.

3.3.3 Método de la huella ecológica nacional

La huella ecológica basada en el compuesto, calcula el impacto ambiental usando el conjunto de datos nacionales. Esta información es más completa que las fuentes sub-nacionales y las valoraciones de los ciclos de vida, y captura el consumo directo e indirecto del compuesto. Para proporcionar una respuesta cuantitativa, para saber cuánta capacidad regenerativa es necesaria para mantener un cierto flujo de recurso, los cálculos de la huella ecológica nacional usan una metodología basada en seis supuestos:

1. Es posible usar las **estadísticas nacionales anuales** para seguir la pista del consumo de recursos y la generación de residuos para la mayoría de los países.
2. El **flujo de recursos** puede ser medido en términos de el área bioproductiva necesaria para su regeneración y la asimilación de sus desechos (los flujos del recurso y el desecho que no pueden ser medidos son excluidos de la valoración o cálculo).

3. Las **áreas bioproductivas** pueden ser expresadas en una unidad común de productividad biológica usable estandarizada. Usable se refiere a la porción de biomasa usada por los humanos, reflejando las asunciones antropocéntricas de la medición de la huella ecológica.
4. La suma de las áreas mutuamente excluyentes necesarias para mantener el flujo de recursos expresados en una unidad común representa el **conjunto de la demanda**; la suma de las áreas bioproductivas mutuamente excluyentes expresadas en una unidad común representa el **conjunto de suministro.**
5. La **demanda humana** (huella o impacto) y el **suministro natural** (biocapacidad) son directamente comparables.
6. El **área de demanda puede exceder al área de suministro**, indicando que las actividades pueden estresar (presionar, exceder el límite) el capital natural por encima de su capacidad regenerativa. Por ejemplo, si la tasa de cosecha de un recurso es el doble que la tasa de regeneración del mismo, el impacto o la huella será el doble que el tamaño del área productiva de suministro. Una huella o impacto mayor que la biocapacidad indica un déficit ecológico, que se define como la cantidad mediante la cual la huella ecológica de una población (o una región) excede la biocapacidad del espacio disponible para esa población o territorio. El déficit ecológico puede ser compensado (equilibrado) a través de importaciones (comercio de déficit ecológico).



7. Los cultivos, bosques, pastos y caladeros de pesca varían en la productividad biológica o en la capacidad para producir los bienes o servicios a partir de la fotosíntesis. Por ejemplo, una hectárea de tierra árida tiene mucha menos capacidad de producir alimento, reciclar nutrientes y soportar diferentes patrones de uso del suelo que una hectárea de bosque templado. Por lo tanto, la huella ecológica normaliza cada área bioproductiva (cultivo, pasto, bosque, caladero de pesca, terreno urbanizable) en unas unidades comunes de "**hectáreas globales**" (gha). Los cálculos actuales ponderan la productividad en función de la aptitud agrícola (una función de múltiples factores, incluyendo la temperatura, precipitación, tipo de suelo y pendiente). La Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA) crearon un índice de aptitud de zonas agro-ecológicas a nivel global, en

función de la distribución espacial explícita de estas variables citadas. Los cálculos recientes de la huella ecológica usan estos índices para pasar de hectáreas a hectáreas globales (Tabla III-6). Otras posibilidades para calcular la productividad incluyen la productividad primaria potencial y la tasa de producción de biomasa económicamente útil.

3.4 MÉTODO DE LAS CUENTAS

Este apartado está basado en el trabajo de Monfreda y colaboradores (2004).

3.4.1 Los componentes del método de las cuentas

Con este método, las cuentas son separadas en dos partes: el suministro ecológico (o áreas bioproductivas) y la demanda a la naturaleza (o huellas ecológicas). Estos elementos incluyen la definición de áreas bioproductivas y su conversión de hectáreas no ponderadas a hectáreas globales estandarizadas con el uso de factores de producción y equivalencia. Una hectárea global es igual a 1 ha con una productividad igual a la productividad media de 11,4 billones de ha bioproductivas. Aquí, la productividad no hace referencia a la tasa de producción de biomasa, como ocurre con la producción primaria neta (NPP). Más bien, la productividad es el potencial para conseguir la producción agrícola máxima en un nivel específico de entradas. Por lo tanto, 1 ha de tierra altamente productiva es igual a más hectáreas globales que 1 ha de tierra menos productiva. Las hectáreas globales son normalizadas para que el número de hectáreas actuales de tierra y océano bioproductivas del planeta sean iguales al número de hectáreas globales (Tabla III-6). Así, las hectáreas globales permiten una comparación con sentido de las huellas ecológicas y las biocapacidades de países diferentes, los cuales usan y tienen diferentes cualidades y zonas mixtas de cultivo, zonas de pastoreo y zonas forestales.

Tabla III-6. Áreas bioproductivas globales. Productividad relativa de las áreas productivas globales más importantes, expresadas en área (hectáreas) y área ponderada en función de la productividad (hectáreas globales). Los factores de equivalencia están basados en el índice de aptitud de zonas globales agro-ecológicas de la FAO/ IIASA. (Fuente: Adaptado a partir de Wackernagel y Monfreda 2004)

ÁREA	ÁREA GLOBAL (Billones ha)	FACTOR EQUIVALENTE (gha/ha)	BIOCAPACIDAD (Billones gha)
Cultivo	1,5	2,1	3,2
Pasto	3,5	0,5	1,6
Bosque	3,8	1,3	5,2
Terreno urbanizable	0,3	2,2	0,6
Caladero de pesca	2,3	0,4	0,8
Total	11,4	1,0	11,4

Los **factores de conversión-equivalencia** (constantes para todos los países, en un año concreto), y los factores de producción (específicos para cada país y cada año), traducen cada una de las áreas biológicamente productivas de hectáreas a hectáreas

globales. Estos factores de equivalencia representan la productividad media potencial mundial de un área bioproductiva concreta, en relación a la productividad media potencial mundial de todas las áreas bioproductivas. Específicamente, un factor de equivalencia es la cantidad de hectáreas globales contenidas dentro de una hectárea media de cultivo, zona urbanizable, bosque, pasto o caladero de pesca.

Los **factores de producción** describen el grado en el que un área concreta de un país, es más o menos productivo que la media global de la misma área bioproductiva (e.g. el factor de producción suizo para las tierras de cultivo sería el cociente entre el factor de producción de zonas de cultivo suizas y el factor de producción en zonas de cultivo mundial).

De manera específica, el factor de producción es el cociente entre el área que un país usa para la producción de todos los bienes que están dentro de una categoría (madera de los bosques; forraje de los pastos, etc.), y el área que sería necesaria para producir los mismos bienes con las producciones medias globales. Los factores de producción reflejan la tecnología predominante y las prácticas de manejo, además de la productividad inherente de recursos naturales de un país. Para cada país, el factor de producción refleja la media nacional, la cual puede variar dramáticamente, particularmente en países que se extienden sobre un número de zonas climáticas grande, como Canadá o Chile. Para análisis locales con mayor resolución, los factores mundiales de producción tienen que ser calculados para cada localidad.

3.4.2 Cálculo de la huella ecológica

La huella ecológica se centra en seis demandas potencialmente renovables: cultivos agrícolas, pastos, bosques, tierras para construcción, pesca y energía. Cada una de estas categorías representa un área (superficie de tierra) en hectáreas, la cual es multiplicada por su factor de equivalencia para obtener la huella ecológica en hectáreas globales.

$$Huella\ ecológica\ (gha) = Área\ (ha) \times Factor\ de\ equivalencia\ (\frac{gha}{ha})$$

3.4.3 Consumo, producción y comercio

Las cuentas nacionales distinguen entre productos producidos dentro del país y los productos consumidos por un país. La producción (toneladas, t) incluye todos los bienes producidos domésticamente sin importar su destino final. Sin embargo, la huella ecológica final sí tiene en cuenta el consumo, que es calculado añadiendo las importaciones y restando las exportaciones de la producción doméstica:

$$Consumo\ neto\ (t) = Producción\ doméstica + Importaciones - Exportaciones$$

Si un país A exporta 1 t de carne de cordero al país B, la huella ecológica de la alimentación, pasto y energía para producir esa cantidad de carne, es obtenida del país A y añadida al país B para determinar la huella ecológica de consumo de carne. A pesar de estos ajustes para el comercio, muchas de las actividades de turismo y viajes

internacionales se atribuyen al país donde ocurren, en vez de al país de donde son los turistas. Esto puede distorsionar el tamaño relativo de la huella ecológica global, pero no afecta a los resultados globales.

3.4.4 La huella ecológica de los recursos renovables

Es la suma de las huellas ecológicas de todos los productos consumidos dentro de esa categoría. Por ejemplo la huella ecológica de una zona de producción agrícola podría incluir los cereales para el consumo humano, remolacha, aceites procesados, y los cultivos para el pienso del ganado.

3.4.5 La huella ecológica de los productos primarios

Estos productos representan el material, no procesado, que se obtiene de un área determinada. Por ejemplo la biomasa que se obtiene de un cultivo de caña de azúcar para producir etanol. La huella ecológica de estos productos (Eq. 1) representa la capacidad biológica y técnica necesaria para su producción (toneladas, t), estandarizada usando la media de producción global (PG (t/ha)):

$$\text{Área}(ha) = \frac{Producción\ (t) + Importaciones\ (t) - Exportaciones\ (t)}{PG(\frac{t}{ha})\qquad\qquad A} \qquad \text{[Eq 1]}$$

3.5 LA HUELLA ECOLÓGICA DE LOS PRODUCTOS SECUNDARIOS

Los productos secundarios son los productos derivados de los productos primarios, en el caso de la biomasa: electricidad, calor y biocombustibles. Mientras que el cálculo de la huella ecológica de un producto primario se calcula en base a una producción global, la huella ecológica de un producto secundario iguala la huella de su producto primario parental. Es decir, que la parte de la huella del producto primario que es usada para manufacturar un producto secundario es movida al producto secundario. Así, la huella ecológica de un producto primario es idéntica sin importar el origen, mientras que la huella ecológica del producto secundario sí que varía en función de la eficiencia de conversión de un país. La huella de un producto secundario sólo es añadida a la huella total de consumo cuando se comercia con él; la huella de un producto secundario que es producido pero que no es comercializado, se incluye en el cálculo de la huella ecológica de su producto primario parental. Recordemos aquí que la huella ecológica basada en las cuentas o relación de artículos sólo incluye la demanda de tierra para estos productos primarios y secundarios, pero no los efectos potenciales en la perdida de bioproductividad.

Las estimaciones de las huellas ecológicas deberían incluir también en el listado de artículos de la demanda, los efectos colaterales de la agricultura, tales como la contaminación del agua a partir de la ganadería intensiva. Pero estos aspectos no se suelen incluir por falta de datos. El área de las importaciones de productos secundarios (A_{IPS}) utiliza el factor de eficiencia de conversión global (FECG), y la producción doméstica de los productos secundarios (A_{PPS}) usa el factor de conversión nacional (FECN). El área de las exportaciones de los productos secundarios (A_{EPS}) es promediada

en proporción a la cantidad de productos importados y producidos y sus respectivos factores de conversión (Eq. 2a, 2b, 3a, 3b y 4). La producción de productos primarios en toneladas, se indica como PPP (t); la producción de productos secundarios se expresa como PPS (t); la producción global primaria se expresa como PGP (t/ha).

$$A_{IPS}(ha) = IPS(t) \times \frac{FECG\ (\frac{t}{t})}{PGP\ (\frac{t}{ha})} \qquad \text{[Eq 2a]}$$

$$FECG = \frac{PPP\ (t)}{PPS\ (t)} \qquad \text{[Eq 2b)}$$

$$A_{PDPS}(ha) = PPS\ (t) \times \frac{FECN\ (\frac{t}{t})}{PGP\ (\frac{t}{ha})} \qquad \text{[Eq 3a]}$$

$$FECN = \frac{PPP\ (t)}{PPS\ (t)} \qquad \text{[Eq 3b]}$$

$$A_{EPS}(ha) = EPS\ (t) \times \frac{A_{IPS}(ha) + A_{PDPS}(ha)}{IPS\ (t) + PPS(t)} \qquad \text{[Eq 4]}$$

3.5.1 La huella ecológica de un área urbanizable

El concepto de huella ecológica asume que los asentamientos humanos y las infraestructuras ocupan la mayoría de las veces regiones fértiles agrícolamente. Algunas de las zonas son pavimentadas y dejan de ser productivas; los parques y jardines siguen siendo productivos.

La huella ecológica incluye las áreas en función de su productividad potencial agrícola. Las áreas urbanizables igualan la misma cantidad de zona de cultivo que remplazan, ajustada para su productividad usando el factor de producción de la zona de cultivo:

$$\begin{aligned} Huella\ ecológica\ de\ la\ construcción\ (gha) &= Área\ urbanizable\ (ha) \\ &\times Factor\ de\ equivalencia\ de\ construcción\ \left(\frac{gha}{ha}\right) \\ &\times Factor\ de\ producción\ de\ cultivos\ (-) \end{aligned}$$



Figura III-8. Recursos primarios y áreas urbanizables

3.5.2 Cálculo de la biocapacidad, déficit ecológico, exceso del límite ecológico y déficit de comercio ecológico

La biocapacidad, o parte de suministro de la ecuación, es el homólogo de la huella ecológica, o parte de la demanda. La biocapacidad total de una nación es la suma de todas sus áreas bioproductivas y también se expresa en hectáreas globales multiplicando sus áreas por el factor de equivalencia y producción específicas para esa nación.

$$Biocapacidad\ (gha) = Área\ (ha) \times Factor\ de\ equivalencia\ \left(\frac{gha}{ha}\right) \times Factor\ de\ producción\ (-)$$

Una comparación de la huella ecológica con la biocapacidad revela si existe capital natural suficiente para soportar los patrones de consumo y producción. Un país donde la huella ecológica excede su biocapacidad alcanza un estado que se conoce como déficit ecológico, el cual es sólo posible de dos formas: importaciones de biocapacidad desde otro país (déficit de comercio ecológico), y mediante el consumo total del capital natural (overshoot). Definimos el déficit ecológico desde una perspectiva de consumo como:

$$Déficit\ ecológico\ (gha) = Biocapacidad\ (gha) - Huella\ ecológica\ de\ consumo\ (gha)$$

Si un país tiene un excedente, es decir, más biocapacidad que huella ecológica, y por lo tanto no tiene déficit ecológico, este excedente podría ser usado para proporcionar bienes y servicios que son consumidos en otros países. Si estos productos fueran vendidos a un segundo país, entonces la correspondiente demanda de biocapacidad al primer país, sería parte de la huella ecológica de producción del primer país, así como parte de la huella ecológica de consumo del segundo país. Los países con baja biocapacidad per capita, típicamente de países con poblaciones muy densas (e.g. Bangladesh, Los Países Bajos, etc.), o con climas inhóspitos (Ethiopía, Arabia Saudí, etc.), no tienen la capacidad para suplir sus demandas de recursos, así que tienen que importar la comida y otros materiales desde países con excedentes, por ejemplo Canadá o Brasil. Restando la huella ecológica de consumo a la huella ecológica de producción, se obtiene el déficit de comercio ecológico, o la capacidad biológica neta importada:

$$Déficit\ de\ comercio\ ecológico\ (gha) = Huella\ ecológica\ de\ consumo\ (gha) - Huella\ ecológica\ de\ la\ producción\ (gha)$$

La naturaleza de los límites ecológicos podría ser una de las ideas equivocadas más influyentes en el debate actual sobre sostenibilidad. El continuo aumento de la población humana (se estiman 9 billones de personas para el año 2050) se contradice con el aumento de consumo de recursos. En realidad lo que ocurre es que los límites se pueden sobre pasar durante un periodo de tiempo porque la naturaleza reacciona

con inercia. En otras palabras, el capital natural puede ser cosechado más rápido de lo que se regenera, y por lo tanto se puede acabar con la fuente de capital natural. A esto se le llama “estado de exceso de límite (overshoot)”.

$$Exceso\ de\ límite\ ecológico\ (gha) = Biocapacidad\ (gha) - Huella\ ecológica\ de\ la\ producción\ (gha)$$

Los efectos retardados de este estado (overshoot) junto con la dificultad de evaluar los servicios ecosistémicos, hace que los mercados y las políticas no se impliquen más en encontrar mecanismos de retroalimentación para gestionar la situación. Mientras que no se establezcan mecanismos adecuados, tales como cuentas sistemáticas que comparen las demandas humanas de la naturaleza y la capacidad de la naturaleza para regenerarse, el exceso del límite ecológico podría pasar inadvertido, y por lo tanto poniendo en riesgo el futuro de la humanidad. El indicador de la huella ecológica es una medida robusta que se puede utilizar para mostrar si se está excediendo el límite de la capacidad del sistema que se está usando.

3.6 LOS MÉTODOS ORIGINALES: HUELLA ECOLÓGICA PARA SUMINISTROS SOSTENIBLES DE ENERGÍA FÓSIL

Los modelos originales de huella ecológica se conocen con el nombre de métodos de Rees y Wackernagel y tratan de calcular la capacidad regenerativa requerida para mantener los combustibles fósiles que son empleados en la economía humana. Hay que enfocar la cuestión desde tres perspectivas: absorber los desechos, mantener el suministro de energía y el recurso que la proporciona. Aunque es localmente significativa, la tierra necesaria para la extracción, eliminación de desechos sólidos y la producción de la energía es comparativamente pequeña (3,2 ha/MW). En contraste, el método de asimilación de desechos coloca a la huella ecológica de las emisiones de carbono durante el funcionamiento, la construcción y el mantenimiento de un sistema típico de combustión de carbón en 1900 gha/MW, y la huella de una planta de biogas de tamaño similar, en 1050 gha/MW.

3.6.1 El método de asimilación de desechos

Es el método más comúnmente empleado para determinar la huella ecológica de los combustibles fósiles, y está basado en el supuesto de que la limitación primaria para el uso de combustibles fósiles es la capacidad de la biosfera para asimilar residuos como las emisiones de CO_2. Desde la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), donde se elaboró el Protocolo de Kyoto, con el que se persigue la estabilización de CO_2 desde entonces, el método de asimilación estima cuánto más grande tendría que ser la biosfera para poder proporcionar los servicios ecosistémicos de absorción y remover el exceso de emisiones de carbono. La mayoría de estos métodos calculan el área necesaria para la asimilación de desechos estimando la superficie forestal adicional necesaria para secuestrar totalmente el CO_2 emitido por la combustión de los combustibles fósiles. El área de secuestro de CO_2 es calculada

deduciendo aproximadamente un tercio de las emisiones antropogénicas absorbidas por los océanos del total de las emisiones antropogénicas.

$$A_{CO_2}(ha) = Emisiones_{CO_2}(t) \times \frac{1-f}{T\ secuestro\ (\frac{t}{ha})} \qquad \text{[Eq 5]}$$

Donde,

f es la fracción absorbida por el océano
T secuestro es la tasa de secuestro de CO_2.
Se han implementado activamente muchas medidas de reforestación a pequeña escala, debatidas como legítimas fuentes de créditos de carbono en negociaciones internacionales sobre clima. Sin embargo, esto no resuelve el problema y las concentraciones de CO_2 en la atmósfera no se estabilizarán sin reducir las emisiones de carbono. Aunque las tasas de secuestro de carbono pueden variar espacial y temporalmente, y las medias globales de secuestro no pueden ser estimadas con gran precisión, el secuestro decrecería significativamente después de 30-50 años como bosque maduro reforestado. Aunque algunos estudios han encontrado que los bosques maduros mantienen su capacidad asimiladora, otros han encontrado que pierden su capacidad o que incluso pasan a ser fuentes netas de carbono.

3.6.2 El método de sustitución por biomasa renovable

Este enfoque se construye sobre la idea de mantener en el tiempo las reservas de materia prima energética. Esto significa que el combustible fósil consumido-acabado podría ser compensado con cantidades equivalentes de materia prima energética. La reserva más común para que la biosfera acumule energía a largo plazo es la madera, así que este método de cálculo de la huella ecológica de los combustibles fósiles, y combustibles no renovables en general, estima el área necesaria para suministrar su energía equivalente en biomasa o combustible leñoso. Por lo tanto, la huella ecológica se convierte en el área necesaria para renovar la energía equivalente de la combustión de los combustibles fósiles.

$$Área\ (ha) = \frac{Energía\ (GJ)}{Producción\ de\ madera\ en\ rollo\ \left(\frac{GJ}{ha}\right) \times Factor\ de\ expansión\ (-)}$$

Si los bosques son gestionados para la producción de combustible leñoso, se podrían obtener mayores producciones y se podría reducir la huella ecológica de los combustibles fósiles. Existen variaciones de esta técnica que describen el área necesaria para derivar la energía equivalente de fuentes de energía fósil, en biomasa cultivada para etanol o metanol obtenido a partir de la agricultura o de la selvicultura. Transformar la biomasa en combustibles líquidos o gaseosos con las tecnologías existentes necesitaría menos energía que la total capturada en la biomasa no transformada. De media, los bosques producen aproximadamente 40 GJ de combustible leñoso/gha.año. Cosechar árboles jóvenes de crecimiento rápido puede aumentar la cantidad a 60 GJ/gha.año. Mucha de la energía capturada por los bosques

mediante la producción primaria neta es perdida debido a la descomposición y a la herbivoría, y una porción de la energía de la biomasa remanente, es decir, la producción primaria neta del sistema, son hojas, raíces y otras fuentes no tan adecuadas como combustible.

3.7 EJEMPLOS DE HUELLA ECOLÓGICA DE LA ENERGÍA DE LA BIOMASA

3.7.1 Huella ecológica de la demanda del suelo

Este método está basado en el Índice de Proceso Sostenible (SPI). La energía de la biomasa tiene unos requerimientos de suelo que ocupar para generar los servicios o el cultivo de la biomasa para producir la materia prima. Uno de los indicadores de ocupación de suelo utilizado en los estudios es la huella ecológica de área ocupada (ej. m^2/persona; m^2/a). En general, la evaluación de los impactos ambientales de la transformación del suelo es compleja. Incluye aspectos como el impacto de la fragmentación del paisaje en las funciones y servicios ecosistémicos, en la naturalidad de las áreas y la biodiversidad. Es necesario siempre evaluar: i) propiedades y condiciones del suelo requerida (ej. arable, cercana o remota al centro de demanda); ii) calidad del uso del suelo (uso múltiple o uso exclusivo); iii) duración y reversibilidad de la transformación del suelo (antiguo uso del suelo). La mayor demanda de tierra de la bioenergía se da durante la producción de la materia prima. En la Tabla III-7 se puede ver que la intensidad de requerimiento de suelo de la bioenergía a partir de cultivos energéticos, es significativamente mayor que para ninguna otra tecnología.

Tabla III-7. Producción y tierra necesaria para la producción de energías renovables (m^2.a/ MJ= m^2 necesarios por área de tierra para producir 1 MJ de energía. Fuente: Stöglehner 2003)

FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE	PRODUCCIÓN (MJ/m^2.a)	TIERRA NECESARIA (m^2.a/MJ)
Cultivo leñoso extensivo	7,3	0,1370
Cultivo leñoso intensivo	18,79	0,0702
Paja (como producto)	4,3	0,2326
Miscanto	25,39	0,0394
Aceite de colza	5,81	0,1721
Metil éster a partir de semilla de colza	4,72	0,2119
Etanol a partir de caña de azúcar	9,3	0,1075
Etanol a partir de remolacha	8,0	0,125
Etanol a partir de madera	4,6	0,2174
Etanol a partir de trigo	4,61	0,2164
Etanol a partir de maíz	1,59	0,6289
Metanol a partir de madera	11,67	0,0857
Biogás	4,98	0,2008
Electricidad fotovoltaica	440	0,0023
Electricidad eólica	900	0,0011
Electricidad de central hidroeléctrica	100	0,01
Calor solar	1200	0,0008

3.7.2 Huella ecológica del consumo de agua

La disponibilidad de agua fresca es un prerrequisito para el crecimiento de la biomasa. Una herramienta o indicador para evaluar los requerimientos de agua para los cultivos, así como el flujo virtual de agua internacional para el comercio de los cultivos y productos, es el concepto de huella ecológica del agua, y se define como el volumen total de agua fresca usada para producir bienes y servicios (producto) relacionados con un cierto patrón de consumo. La huella ecológica del uso de agua se expresa en m^3/kg de producto, m^3/cabeza.año, o m^3/año a un nivel nacional. La huella ecológica en este caso tiene tres componentes: agua virtual verde, azul y gris. El contenido de agua virtual verde de un producto hace referencia a la cantidad de agua procedente de lluvia evaporada durante el periodo de cultivo; el contenido de agua virtual azul hace referencia a la superficie y a la cantidad de agua evaporada de la empleada en el riego durante el cultivo; el contenido virtual gris de un producto es la cantidad de agua contaminada durante la etapa de producción. Para calcular la huella ecológica de un cultivo energético hay que tener en cuenta el uso (aporte o insumo) de el agua que recibe a partir de la precipitación y el agua de riego que se necesita para la producción de la biomasa. Y después, hay que calcular la evaporación diaria del cultivo (mm/ día) durante todo el periodo de crecimiento del cultivo. El cálculo se puede hacer en cinco pasos, sin tener en cuenta estos componentes para que se pueda comparar la huella ecológica del uso de agua en bioenergía con las huellas de otras tecnologías energéticas. El primer paso es calcular los requerimientos hídricos de un cultivo c (CWR, m^3/ha), en una superficie concreta, y estimar la evapotranspiración durante todo el periodo de cultivo a partir de datos climáticos y un algoritmo sencillo.

$$CWR(c) = 10 \times \sum_{d-1}^{1p} K_c(c) \times ET_0 \qquad \text{[Eq 6]}$$

El segundo paso consiste en el cálculo de la producción total de biomasa (BY, t/ha). La diferencia entre la producción de biomasa total y la producción del cultivo consiste en una fracción resto que es no adecuada como alimento, pienso o materiales de producción, pero que puede ser empleada para la producción de energía. La producción de biomasa total se puede calcular como sigue:

$$BY(c) = \frac{Y(c)}{HI(c)} \qquad \text{[Eq 7]}$$

Donde

Y(c) es la producción del cultivo (t/ha) y
HI(c) es el índice de cosecha para el cultivo c (FAO; 2007)

El tercer paso consiste en el cálculo de la huella ecológica de uso de agua del cultivo c por unidad de masa, WF_M(c) (m^3/t). Esto se hace dividiendo el requerimiento hídrico del cultivo entre la producción de biomasa.

$$WF_M(c) = \frac{CWR\ (c)}{BY\ (c)} \qquad \text{[Eq 8]}$$

El cuarto paso es el cálculo del contenido de energía medio de un cultivo hipotético, E(c) (GJ/t). Esto se puede obtener combinando datos sobre los valores mayores de calor de combustión (HHV en KJ/g= GJ/t) de los componentes de las plantas (Tabla III-8), con información sobre la composición del calor de combustión de un cultivo.

$$E(c) = HI(c) \times DM_y(c) \times \sum_{i=1}^{5} C_i \times A_{y,i} + \left(1 - HI\,(c) \times DM_r(c) \times \sum_{i=1}^{5} C_i \times A_{r,i}\right)$$ [Eq 9]

Donde,

HI(c) es el índice de cosecha del cultivo
DMr(c) es la fracción de masa seca contenida en la fracción resto
C es el calor de combustión del componente *i* (HHV)
A es la cantidad del componente *i* en la fracción de masa seca de la producción del cultivo o la fracción resto (g/g).

Tabla III-8. Calor de combustión para 6 grupos grandes de componentes de las plantas (Fuente: Gerbens-Leenes et al. 2009)

COMPONENTE DE LA PLANTA	CALOR DE COMBUSTIÓN (KJ/ g)
Carbohidratos	17,3
Proteínas	22,7
Grasas	37,7
Ligninas	29,9
Ácidos orgánicos	13,9
Minerales (K, Ca, P, S)	0,0

Finalmente, en el último paso se calcula la huella ecológica del uso de agua para la producción de energía a partir de biomasa (m^3/ GJ), dividiendo los resultados de los pasos 3 y 4:

$$Huella = \frac{WF_M(c)}{E\,(c)}$$ [Eq 10]

Si evaluamos la huella ecológica del uso del agua para la producción de diferentes portadores de energía primaria derivados a partir de la biomasa, expresada como la cantidad de agua consumida para producir una unidad de energía (m^3/ GJ), vemos que existen grandes diferencias entre las huellas calculadas para diferentes tipos de portadores de energía primaria de la biomasa. La huella ecológica del uso del agua en la bioenergía es mucho mayor que la huella ecológica de las energías fósiles (Tabla III-9). Por ejemplo basado en el uso de energía media per capita en las sociedades occidentales (100 GJ/capita/año), una mezcla de carbón, crudo, gas natural y uranio requiere cerca de 35 m^3 por persona por año. Si la misma cantidad de energía es generada a través del crecimiento de biomasa en un sistema agrícola muy productivos, como los aplicados en Holanda, la huella ecológica es de 2.420 m^3. Sin embargo, la huella ecológica varía en función del tipo de cultivo, el sistema de producción agrícola y el clima (Tabla III-10).

Tabla III-9. Huella ecológica del uso del agua para otras energías primarias (Fuente: Gleik 1994; Gerbens-Leenes et al. 2009)

FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA	HUELLA ECOLÓGICA MEDIA DEL USO DE AGUA (m^3/ GJ)
Energía eólica	0,0
Energía nuclear	0,1
Gas natural	0,1
Carbón	0,2
Energía solar térmica	0,3
Petróleo	1,1

Tabla III-10. Huella ecológica del uso del agua para cultivos de biomasa (Fuente: Gerbens-Leenes et al. 2009)

CULTIVO	PAÍSES BAJOS	EE.UU.	Brasil	Zimbabwe
Cassava	-	-	30	205
Coco	-	-	49	203
Algodón	-	135	96	356
Groundnuts	-	58	51	254
Maíz	9	18	39	200
Miscanthus	20	37	49	64
Aceite del fruto de la palma	-	-	75	-
Chopo	22	42	55	72
Patata	21	32	31	65
Soja	-	99	61	138
Remolacha	13	23	-	-
Caña de azúcar	-	30	25	31
Girasol	27	61	54	146
Trigo	9	84	83	69
Colza	67	113	214	-
Media	**24**	**57**	**62**	**142**

La huella ecológica de la producción de materia prima es altamente dependiente del tipo de materia prima, condiciones climáticas regionales y locales, y las prácticas de manejo de los cultivos. Además estos factores pueden cambiar interanualmente (como la precipitación), y la huella ecológica para el uso de agua en la bioenergía puede diferir significativamente en función del destino de la biomasa. Por ejemplo, la huella ecológica actual del uso o consumo de agua para la producción de materia prima para la generación de electricidad es entre 70-400 veces más grande que los requerimientos de consumo de agua operacional para otras energías renovables. La actual huella ecológica global media del consumo de agua (promediada por la producción de biomasa) para la producción de materia prima para biocombustibles varía entre 60-600 litros por MJ de combustible. Por ejemplo, la huella ecológica de consumo de agua para biodiesel es aproximadamente entre 2 y 4 veces más grande que la huella ecológica de consumo de agua de los cultivos para etanol, porque los cultivos de de semillas oleaginosas son menos eficientes en el uso del agua. Refinar y procesar los

biocombustibles requieren alrededor de 0,1- 0,5 litros de agua por MJ de combustible, lo que es mucho menos que las necesidades de producción de la materia prima, pero aún así mucho mayor que el de la producción de los productos derivados del petróleo. Por lo tanto, sin una gestión adecuada del recurso, un incremento en la producción de energía podría incrementar la competición por el agua en zonas críticas (Sathaye et al., 2011). Sin embargo la proporción de agua irrigada entre el agua total consumida varía considerablemente, y la relación entre la vegetación y los procesos hidrológicos a nivel de paisaje es compleja. De hecho, algunos sistemas de producción de materia prima podrían conducir el uso del suelo hacia una productividad de agua mayor y una competición por el agua menor, como por ejemplo los cultivos leñosos cultivados con rotaciones de varios años. Algunas especies perennes pueden incrementar la función de retención de agua en tierras degradadas, y se pueden obtener ganancias considerables en la eficiencia de uso del agua con manejos agrícolas mejorados.



3.7.3 Evaluación del ciclo de vida (LCA) de los biocombustibles

En una evaluación del índice de proceso sostenible (SPI) del ciclo de vida de los biocombustibles llevada a cabo por Gwehenberger et al. (2007), se identificaron tres aspectos principales que influyen en los impactos ambientales de los biocombustibles: i) la materia prima (incluyendo las prácticas agrícola para proporcionarla); ii) el proceso y iii) el tamaño de las instalaciones. En este estudio, se consideraron tres opciones de procesamiento. Opción 1, producción de etanol en combinación con una planta de biogás combinada de calor y electricidad (combined heat and power, CHP); Opción 2, producción de etanol en combinación con la producción de biogás; Opción 3, producción de etanol combinado con la combustión de la materia. Para probar estos procesos, se ensayaron tres capacidades de producción, que fueron desde 1.000 t/a de bioetanol (que es la producción de una granja), pasando por 10.000 t/a (que es una producción para una central de pequeña escala), hasta una producción a gran escala (60.000 t/a). Los resultados interesantes de esta evaluación fueron que con la Opción 1, la huella ecológica incrementó con el tamaño de la producción. La razón de esto fue que con esa opción la planta de biogás era demasiado grande y sólo el calor extra (off-heat) era usado para proporcionar energía para la producción de etanol. Cuanto mayor es la capacidad de la planta, más estiércol tiene que ser reciclado para volver a los

campos, conduciendo a un exceso de transporte y presiones medioambientales. Las Opciones 2 y 3 presentaron una huella ecológica decreciente con el tamaño. Esto es el resultado del incremento de la eficiencia de las tecnologías con la capacidad de producción (las tecnologías son optimizadas a la capacidad de suministro y no al revés). La huella ecológica de todas las opciones convergió para la capacidad de 10.000 t/a. La huella ecológica a gran escala (60.000 t/a de bioetanol) fue cuatro veces superior que la opción de capacidad 10.000 t/a. La razón es que con ese tamaño, el uso de la bioenergía comienza a ser problemático debido al impacto del transporte. Las plantas de bioetanol convencionales, usan por eso gas natural para proporcionar energía al proceso y por lo tanto tienen huellas ecológicas superiores.

Los biocombustibles "convencionales" (biodiesel a partir de aceite de semilla de colza, toda la producción de bioetanol a gran escala), sólo ofrecen una ventaja limitada (aprox. 30 %) en términos de impacto ambiental en comparación con la huella de los combustibles fósiles. Esto también indica la gran dependencia de la huella ecológica en el tipo de materia prima usada, especialmente en el caso del biodiesel: utilizar los productos de otros sectores (como grasa animal) o incluso material de desecho (aceite usado de cocina) hace disminuir la huella ecológica de forma considerable. Si comparamos el bioetanol obtenido a partir de trigo y maíz se hace visible la diferencia en la producción por hectárea. Como el maíz tiene una productividad mayor que el trigo, la huella ecológica del bioetanol basado en maíz se hace más pequeña. Sin embargo, esta ventaja que otorga la materia prima no puede ser compensada por la desventaja del sistema industrial de la producción. Una reducción más impresionante en la huella ecológica se puede obtener usando biogás o biocombustible. Aquí la gran producción por hectárea (ya que se utiliza la planta entera en contraste con la producción del bioetanol donde sólo se utiliza el grano), se combina con los ingresos de la agricultura (menos fertilizante, no hay que secar) y poco impacto durante el proceso de conversión (poco calor y necesidad de electricidad moderada).

3.8 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

FAO. 2007. http://www.fao.org/

Gerbens-Leenes PW, Hoekstra AY, van der Meer Th. 2009. The waterfootprint of energy from biomasa: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. *Ecological Economics*. 68**:** 1052-1060.

Gleick. 1994. Water and energy. *Annual Review of Energy and the Environment*. 19: 267–299.

Gwehenberger G, Narodoslawsky M, Liebmann B, Friedl A. 2007. Ecology of scale versus economy of scale of bioethanol production. *Biofuels Bioprod. Bioref.* 1. doi: 10.1002/bbb.35.

Krotscheck C, Narodoslawsky M, 1996. The Sustainable process index. A new dimension in ecological evaluation. *Ecological Engineering* 6: 241–258.

Loh J. (Ed.) 2002. Living Planet Report 2002. World-Wide Fund for Nature International (WWF), UNEP World Conservation Monitoring Centre, Redefining Progress, Center for Sustainability Studies, Gland, Switzerland.

Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. 2004. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*. 21: 231–246.

Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH et al. 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science.* 311: 484-489.

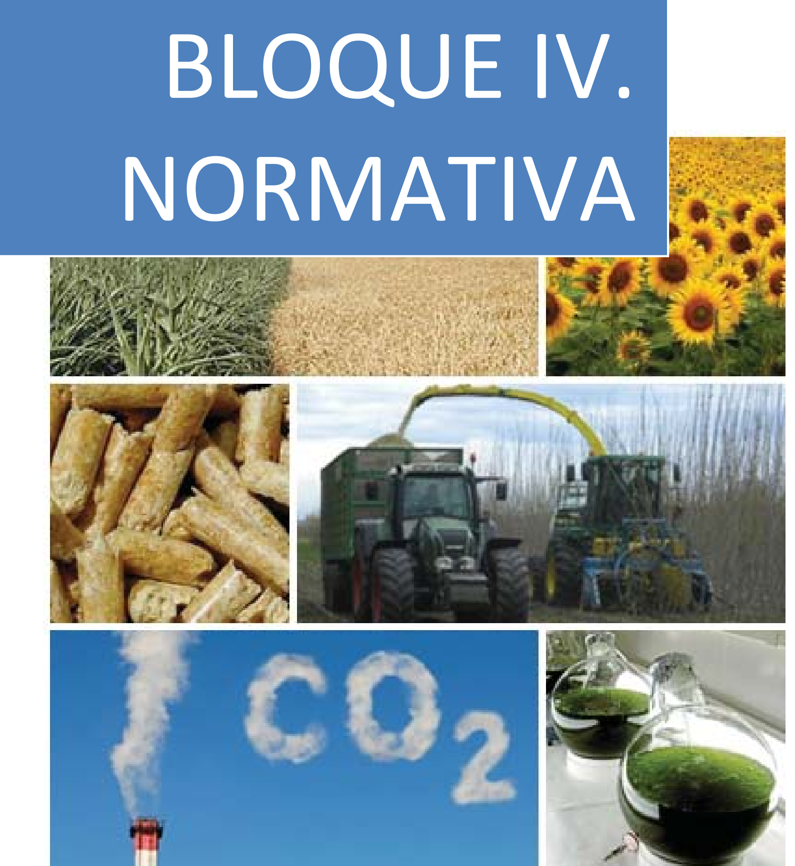
Sathaye J, Lucon O, Rahman A et al. 2011. *Renewable Energy in the Context of Sustainable Development*. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O Edenhofer, R Pichs-Madruga, Y Sokona, K Seyboth, P Matschoss, S Kadner, T Zwickel, P Eickemeier, G Hansen, S Schlömer, C von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Stöeglehner G, Narodoslawsky M. 2009. How sustainable are biofuels? Answers and further questions arising from an ecological footprint perspectiva. *Bioresource Technology*. 100: 3825-3830.

Stöglehner G. 2003. Ecological footprint: a tool for assesing sustainable energy supplies. *Journal of Cleaner Production*. 11: 267-277.

Wackernagel M, Monfreda C. 2004. Ecological footprints and energy. *Encyclopedia of Energy.* 2: 1-11

BLOQUE IV. NORMATIVA



BLOQUE IV. NORMATIVA

1 LEGISLACIÓN APLICABLE A LA BIOMASA PARA USO ENERGÉTICO

1.1 INTRODUCCIÓN

La legislación sobre biomasa y su aprovechamiento energético es muy amplia y está desarrollada a muy diversos niveles. Hemos recogido la normativa comunitaria y nacional más representativa para la biomasa de uso energético. Los enlaces a la normativa se han incluido en la plataforma moodle para facilitar su consulta por parte de los usuarios de este texto. Así mismo se han incluido los enlaces a las páginas web de los organismos responsables de las políticas energéticas.



1.2 NORMATIVA EUROPEA

1.2.1 Directiva 98/70/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 1998 relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE del Consejo

Introduce especificaciones ambientales aplicables a los combustibles para reducir las emisiones contaminantes de los automóviles: se prohíbe la comercialización de la gasolina con plomo y es obligatorio disponer de combustibles sin azufre en el territorio de la Unión. El uso de biocarburante se convierte, asimismo, en una necesidad en el marco de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.2.2 Comunicación de la Comisión, de 7 de diciembre de 2005, «Plan de acción sobre la biomasa»

El plan de acción que ha elaborado la Comisión en el ámbito de la biomasa se inscribe en una política energética, integrada y coherente, y responde de forma especial a la necesidad de promover las fuentes de energía renovables.

La presente Comunicación presenta una serie de medidas comunitarias con las que se pretende aumentar la demanda de biomasa, reforzar la oferta, eliminar los obstáculos técnicos y desarrollar la investigación.

1.2.3 Comunicación de la Comisión, de 8 de febrero de 2006, «Estrategia de la UE para los biocarburantes»

La Unión Europea (UE) fija siete ejes estratégicos para el desarrollo de la producción y uso de los biocarburantes, un recurso renovable obtenido a partir de la biomasa por los Estados miembros y los países en desarrollo:

- actuar en provecho del medio ambiente
- estimular la demanda de biocarburantes
- desarrollar la producción y distribución de biocarburantes
- ampliar el suministro de materias primas
- potenciar las oportunidades comerciales
- apoyar a los países en desarrollo
- fomentar la investigación y la innovación



1.2.4 Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 23 de abril de 2009 sobre la promoción del uso de la energía procedente de fuentes renovables junto con las normas que modifican y derogan las directivas 2001/77/EC y 2003/30/EC

La presente Directiva establece un marco común para el fomento de la energía procedente de fuentes renovables. Fija objetivos nacionales obligatorios en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía y con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el transporte. Establece normas relativas a las transferencias estadísticas entre Estados miembros, los proyectos conjuntos entre Estados miembros y con terceros países, las garantías de origen, los procedimientos administrativos, la información y la formación, y el acceso a la red eléctrica para la energía procedente de fuentes renovables. Define criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos:

A efectos de la presente Directiva, se entenderá por:

a) "energía procedente de fuentes renovables": la energía procedente de fuentes renovables no fósiles, es decir, energía eólica, solar, aerotérmica, geotérmica, hidrotérmica y oceánica, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás;
b) "energía aerotérmica": la energía almacenada en forma de calor en el aire ambiente;
c) "energía geotérmica": la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida;
d) "energía hidrotérmica": la energía almacenada en forma de calor en las aguas superficiales;
e) "biomasa": la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales;
f) "consumo final bruto de energía": los productos energéticos suministrados con fines energéticos a la industria, el transporte, los hogares, los servicios, incluidos los servicios públicos, la agricultura, la silvicultura y la pesca, incluido el consumo de electricidad y calor por la rama de energía para la producción de electricidad y calor e incluidas las pérdidas de electricidad y calor en la distribución y el transporte;
g) "sistemas urbanos de calefacción" o "sistemas urbanos de refrigeración": la distribución de energía térmica en forma de vapor, agua caliente o fluidos refrigerantes, desde una fuente central de producción a través de una red a múltiples edificios o emplazamientos, para la calefacción o la refrigeración de espacios o procesos;
h) "biolíquido": un combustible líquido destinado a usos energéticos distintos del transporte, incluidas la electricidad y la producción de calor y frío, producido a partir de la biomasa;
i) "biocarburante": un combustible líquido o gaseoso utilizado para el transporte, producido a partir de la biomasa;
j) "garantía de origen": un documento electrónico cuya única función es demostrar a un consumidor final que una cuota o cantidad determinada de energía se ha obtenido a partir de fuentes renovables conforme a lo establecido por el artículo 3, apartado 6, de la Directiva 2003/54/CE.

Cada Estado miembro adoptará un plan de acción nacional en materia de energía renovable. Los planes de acción nacionales en materia de energía renovable determinarán los objetivos nacionales de los Estados miembros en relación con las cuotas de energía procedente de fuentes renovables consumidas en el transporte, la electricidad, la producción de calor y frío en 2020. Cada Estado miembro velará para

que la cuota de energía procedente de fuentes renovables en todos los tipos de transporte en 2020 sea como mínimo equivalente al 10 % de su consumo final de energía en el transporte. En el caso de la **biomasa**, los Estados miembros fomentarán las tecnologías de conversión que permitan una eficiencia de conversión de al menos un 85 % para aplicaciones residenciales y comerciales y de al menos un 70 % para aplicaciones industriales.

La Directiva fija reglas claras y transparentes para el cálculo de la cuota de energía procedente de fuentes renovables y definición de las fuentes: La metodología y las definiciones utilizadas en el cálculo de la cuota de energía procedente de fuentes renovables serán las previstas en el Reglamento (CE) 1099/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2008, sobre estadísticas en el ámbito de la energía.

Se establecen procedimientos administrativos, reglamentos y códigos relativos a autorización, certificación y concesión de licencias a las instalaciones e infraestructuras conexas de transporte y distribución para la producción de electricidad, calor o frío a partir de fuentes de energía renovables, y al proceso de transformación de la biomasa en biocarburantes u otros productos energéticos.

Se dispone que los Estados miembros fomentarán, en sus normas y códigos de construcción, la utilización de sistemas y equipos de calefacción y refrigeración a partir de fuentes renovables que permitan reducir el consumo de energía. En el caso de la biomasa, los Estados miembros fomentarán las tecnologías de conversión que permitan una eficiencia de conversión de al menos un 85 % para aplicaciones residenciales y comerciales y de al menos un 70 % para aplicaciones industriales.

En su artículo 17, esta directiva fija criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos que garanticen que no se producirán a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad. Por otro lado, contemplaba la necesidad de fijar los requisitos de un sistema de sostenibilidad para los **usos energéticos de la biomasa,** distintos de los biocarburantes y biolíquidos, estableciendo como fecha límite el 31 de diciembre de 2009.

Se determina cuáles son los criterios de verificación del cumplimiento de los criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos.

Se establece la metodología para el cálculo del efecto de biocarburantes y biolíquidos en las emisiones de gases de efecto invernadero.

En el artículo 23, se acuerda establecer 2018 como fecha límite para que la Comisión presente una hoja de ruta de la energía renovable para el período posterior a 2020.

Finalmente, según el Art.26. quedan **derogadas**, con efectos a partir del 1 de enero de 2012, las **Directivas 2001/77/CE**, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad y

2003/30/CE, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte.

1.3 NORMATIVA NACIONAL

1.3.1 Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico

Esta ley introduce la liberalización en las actividades de generación y comercialización de energía eléctrica y marca un hito en la política energética de nuestro país con la creación del **régimen especial** de generación eléctrica. Establece una diferenciación entre un conjunto de instalaciones de producción de energía eléctrica que conforman el denominado "régimen especial", las cuales disfrutan de una cierta singularidad jurídica y económica frente al resto de instalaciones de producción integrantes del llamado "régimen ordinario". Desde el punto de vista de la retribución, la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial se caracteriza por la posibilidad de que su régimen retributivo se complemente mediante la percepción de una prima, para cuya determinación pueden tenerse en cuenta factores como el nivel de tensión de entrega de la energía a la red, la contribución a la mejora del medio ambiente, el ahorro de energía primaria, la eficiencia energética y los costes de inversión en que se haya incurrido.

La actividad de producción de energía eléctrica tendrá la consideración de producción en régimen especial cuando se utilice como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.

1.3.2 Real Decreto 2019/1997, de 26 de diciembre, por el que se organiza y regula el mercado de producción de energía eléctrica

El presente Real Decreto, de conformidad con la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, tiene por objeto establecer la **organización del mercado** de producción de energía eléctrica y regular las transacciones que en el mismo se realicen, así como regular otras modalidades de contratación que tengan por objeto la compra y venta de energía eléctrica.

El mercado de producción de energía eléctrica se estructura en mercado diario y mercado de servicios complementarios, integrándose también en él los contratos bilaterales físicos.

1.3.3 Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación

Una de las actuaciones más ambiciosas que se han puesto en marcha en el seno de la Unión Europea para la aplicación del principio de prevención de emisiones contaminantes, ha sido la aprobación de la **Directiva 96/61/CE**, del Consejo, de 24 de

septiembre, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. Esta Directiva, supedita la puesta en marcha de las instalaciones incluidas en su ámbito de aplicación a la obtención de un permiso escrito, en el que se fijarán las condiciones ambientales que se exigirán para la explotación de las instalaciones y los valores límite de emisión de sustancias contaminantes. La incorporación al ordenamiento interno español de la mencionada Directiva 96/61/CE se lleva a cabo, con carácter básico, mediante esta Ley.

A estos efectos, el control integrado de la contaminación descansa fundamentalmente en la **autorización ambiental integrada**, una nueva figura de intervención administrativa exigible a instalaciones con una potencia térmica de combustión superior a 50 MW, entre las que se cuentan:

- Instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen ordinario o en régimen especial, en las que se produzca la combustión de combustibles fósiles, residuos o biomasa.
- Instalaciones de cogeneración, calderas, hornos, generadores de vapor o cualquier otro equipamiento o instalación de combustión existente en una industria, sea ésta o no su actividad principal.

1.3.4 Real Decreto 430/2004, de 12 de marzo, por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refinerías de petróleo

Este real decreto tiene por objeto regular las **emisiones a la atmósfera** de dióxido de azufre, de óxidos de nitrógeno y de partículas procedentes de grandes instalaciones de combustión.

En el capítulo II, se establecen los valores límite de emisión que se aplicarán a las instalaciones de combustión cuya potencia térmica nominal sea igual o superior a 50 MW, cualquiera que sea el tipo de combustible que utilicen (sólido, líquido o gaseoso). A estos efectos, define Biomasa como los productos compuestos total o parcialmente por una materia vegetal de origen agrícola o forestal, que puedan ser utilizados como combustible para valorizar su contenido energético, y los siguientes residuos utilizados como combustibles:

- Residuos vegetales de origen agrícola y forestal.
- Residuos vegetales procedentes de la industria de elaboración de alimentos, si se recupera el calor generado.
- Residuos vegetales fibrosos procedentes de la producción de pulpa virgen y de la producción de papel a partir de la pulpa, si se coincidieran en el lugar de producción y se recupera el calor generado.

- Residuos de corcho.

5.º Residuos de madera, con excepción de aquellos que puedan contener compuestos organohalogenados o metales pesados como consecuencia de algún tipo de tratamiento con sustancias protectoras de la madera o de revestimiento, lo que incluye, en particular, los residuos de madera procedentes de residuos de construcción y demolición.

1.3.5 Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la disposición final segunda de la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE).

El CTE hace posible el crecimiento de la biomasa -como fuente renovable- al amparo del artículo 15.4, que establece la contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.

1.3.6 Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial

Este real decreto supedita el derecho a la percepción de la prima a la inscripción definitiva de la instalación el **Registro de instalaciones de producción en régimen especial** dependiente de la dirección General de Política Energética y Minas.

Su ámbito de aplicación se extiende, entre otras instalaciones, a:

- Cogeneraciones que utilicen como combustible principal biomasa y/o biogás, siempre que ésta suponga al menos el 90 por ciento de la energía primaria utilizada.
- Instalaciones que utilicen como energía primaria alguna de las energías renovables no consumibles, biomasa, o cualquier tipo de biocarburante, siempre y cuando su titular no realice actividades de producción en el régimen ordinario.

1.3.7 Real Decreto-ley 6/2009, de 30 de abril, por el que se adoptan determinadas medidas en el sector energético y se aprueba el bono social

Establece mecanismos para controlar el creciente déficit tarifario, esto es, la diferencia entre la recaudación por las tarifas que pagan los consumidores por sus suministros regulados y los costes reales asociados a dichas tarifas.

Se adoptan medidas respecto al sistema retributivo de las instalaciones del régimen especial. Así, se crea el **Registro de pre-asignación de retribución**; la inscripción en

dicho registro será condición necesaria para el otorgamiento del derecho al régimen económico establecido en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

1.3.8 Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible

La Ley de Economía Sostenible es una de las piezas clave de la **Estrategia para una Economía Sostenible**, aprobada por el Consejo de Ministros en noviembre de 2009, y articulaba un ambicioso programa de reformas, una de cuyas líneas estratégicas era el fomento de las actividades relacionadas con las energías limpias y el ahorro energético; la presente ley establece:

Artículo 82.1 “Las Administraciones Públicas, en el ámbito de sus competencias, fomentarán las actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación de interés en el campo de las energías renovables y del ahorro y la eficiencia energética, potenciando el desarrollo de aquellas tecnologías que utilicen fuentes limpias y puedan contribuir a la reducción de emisiones, entre otras las de secuestro y almacenamiento o carbón limpio. Igualmente fomentarán el desarrollo de aquellas tecnologías que incorporen una mayor gestionabilidad, innovación y eficiencia al sistema, en particular, las que utilicen fuentes de energía primaria renovable”.

1.3.9 Real Decreto-ley 1/2012, de 27 de enero, por el que se procede a las suspensión de los precedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos

En su preámbulo, este real decreto-ley estima que el crecimiento que las tecnologías incluidas en el régimen especial ha superado los objetivos previstos en el Plan de Energías Renovables 2005-2010, y ha puesto de manifiesto un desequilibrio entre los costes de producción y el valor de las primas. Con el fin de suprimir dicho déficit tarifario a partir de 2013, este real decreto-ley establece:

”Se suprimen los valores de las tarifas reguladas, primas y límites previstos en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, para todas las instalaciones que se encuentren en el ámbito de aplicación del presente real decreto-ley”.

No obstante, para aquellas tecnologías cuyos objetivos no han sido cubiertos (cogeneración, biomasa, biogás, hidráulica y residuos), este real decreto-ley contempla:

”El Gobierno podrá establecer reglamentariamente regímenes económicos específicos para determinadas instalaciones de régimen especial, así como el derecho a la percepción de un régimen económico específico y, en su caso, determinadas obligaciones y derechos de los regulados en los apartados 1 y 2 del artículo 30 de la

Ley 54/1997, de 23 de noviembre, del Sector Eléctrico, para aquellas instalaciones de producción de energía eléctrica de cogeneración o que utilicen como energía primaria, energías renovables no consumibles y no hidráulicas, biomasa, biocarburantes o residuos agrícolas, ganaderos o de servicios, aun cuando las instalaciones de producción de energía eléctrica tengan una potencia instalada superior a 50 MW."

1.3.10 Plan de Energías Renovables 2011-2020

La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables requiere que cada Estado miembro elabore y notifique a la Comisión Europea (CE) un **Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER)** para el periodo 2011-2020, con vistas a la consecución de los objetivos que la Directiva fija en una cuota mínima del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía, y una cuota mínima del 10% en el sector del transporte para el año 2020.

La Secretaría de Estado de Energía del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, a través del IDAE, elaboró el **PER 2011-2020**, que incluye los elementos esenciales del PANER, así como un análisis sectorial que incluye las perspectivas de evolución tecnológica y la evolución esperada de costes.

Las fuentes de energía renovables a las que se refiere el PER son las siguientes: biocarburantes y biolíquidos, biogás, biomasa, energías del mar, eólica, geotermia y otras energías del ambiente, hidroeléctrica, residuos (municipales, industriales y lodos de EDAR) y solar (fotovoltaica, térmica y termoeléctrica).

La evolución según el PER, y analizada según tecnologías, de algunos de dichos indicadores energéticos, sería la siguiente:

1.1.1.1 Biocarburantes

En España, la capacidad de producción instalada a finales de 2010 (datos del IDAE) superó los 4 millones de tep, repartidos en 464.000 toneladas de bioetanol (4 plantas) y 4.318.400 toneladas de biodiesel (47 plantas). El sector de los biocarburantes se encuentra inmerso en un proceso de cambio que afecta principalmente a la variedad de materias primas susceptibles de ser utilizadas y a las tecnologías de producción. En este sentido, el plan de implementación de la Iniciativa Industrial Europea sobre Bioenergía (EIBI, del SET-Plan), establece como áreas tecnológicas prioritarias las cadenas de valor basadas en procesos termoquímicos y bioquímicos de conversión de la materia prima.

1.1.1.2 Biogás

El potencial de generación de biogás en España se estima en unos 1,8 Mtep, destacando el biogás agroindustrial, que aporta el 78% de este potencial. Si bien hasta ahora, el biogás de vertedero ha sido el principal contribuyente a la generación de

biogás en España, los altos potenciales de biogás agroindustrial hacen pensar que la tecnología de generación de biogás que más se desarrollará será la de los digestores anaerobios, aplicada a residuos agroindustriales y ganaderos. En el caso de estos últimos, la aplicación de esta tecnología implica una importante reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.1.1.3 Biomasa

En la actualidad la mayor parte de los 3.655 ktep de consumo térmico final de biomasa en España proviene del sector forestal, utilizándose en el sector doméstico, mediante sistemas tradicionales poco eficientes (uso de leñas en equipos obsoletos) y en industrias forestales para consumo térmico o cogeneración. Existe una potencia instalada de 533 MW abastecida con residuos de industrias agroforestales y restos de cultivos agrícolas principalmente.

En los últimos años se está iniciando el desarrollo de los cultivos energéticos y de la mecanización específica para la recogida, extracción y tratamiento de biomasa. Respecto a las aplicaciones, la implantación de tecnologías modernas para la biomasa térmica en edificios y los desarrollos tecnológicos en gasificación y ciclos ORC para la implantación de cogeneraciones hacen prever, para los próximos años, una importante expansión de la biomasa en el sector térmico en edificios e instalaciones industriales.

El potencial de biomasa disponible en España se sitúa en torno a 88 millones de toneladas de biomasa primaria en verde y más de 12 millones de toneladas de biomasa secundaria seca.

El incremento de la producción eléctrica con biomasa se conseguirá mediante la generación distribuida a través de pequeñas cogeneraciones y centrales eléctricas en el entorno de los 15 MW.




Unión Europea
Fondo Social Europeo
"El FSE invierte en tu futuro"


GOBIERNO
DE ESPAÑA
MINISTERIO
DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE